

Sami Roikonen

# Betonirakenteiden pinnoitettavuuskriteerit ja homeriskin laskennallinen tarkastelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

10.1.2014

Tekijä(t) Otsikko  Sivumäärä Aika	Sami Roikonen Betonirakenteiden pinnoitettavuuskriteerit ja homeriskin laskennallinen tarkastelu 45 sivua + 5 liitettä 10.1.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Hannu Hakkarainen Yksikönjohtaja Ilkka Jerkku
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin FMC Groupiin kuuluvalla Finnmap Consulting Oy:lle. Tutkimus lähti liikkeelle epäilystä, että betonirakenteiden pintamateriaalien asennuskriteerit sallivat liian kostean betonipinnan pinnoittamisen. Nykyisillä ohjeistuksilla on mahdollista pinnoittaa betonilattia tiiviillä epoksinnoitteella, kun alustan suhteellinen kosteus on vielä 97 %.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, aiheuttavatko nykyiset pinnoitusvaatimukset homehtumisriskiä betonirakenteissa. Tutkimus toteutettiin täysin vastikään Teknologian tutkimuskeskus VTT:n (VTT) ja Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) kehittämällä VTT-TTY homemallilla sekä WUFI PRO 5.2 - ja WUFI 2D 3.3 -simulointiohjelmien avulla. Tarkasteltavat pinnoitusvaatimukset saatiin SisäRYL 2013 -ohjeistuksesta ja muusta alan kirjallisuudesta. Työssä tarkasteltiin teräsbetonivälipohjaa, ontelolaattaa, teräsbetonialapohjaa. Näissä rakenteissa tutkittiin linoleumimattoja, muovimattoja ja keraamista laatoitusta. Lisäksi tutkittiin tuulettamatonta betonisandwich-seinää, jonka yhteydessä tarkasteltiin keraamista laatoitusta ja maalipintaa.</p> <p>Työ toteutettiin simuloimalla tarkasteltavat rakenteet sopivalla simulointiohjelmalla ja tuloksena saadut kosteus- ja lämpötekniset tiedot analysoitiin VTT-TTY homemallilla. Home-mallia käyttämällä saadaan selville tarkastelukohdan homeindeksi. Homeindeksi perustuu homehtumisasteen visuaaliseen arviointiin ja se on väliltä 0...6. Nolla tarkoittaa puhdasta pintaa ja homeen kasvu havaitaan mikroskoopilla, kun saavutetaan arvo 1. Homeindeksi 6 tarkoittaa, että rakenne on lähes kokonaan homekasvuston peitossa.</p> <p>Työn tuloksena saatiin selville, että linoleumimaton alapohjan juuttikangas homehtuu kaikissa rakenteissa, paitsi ontelolaatassa. Muiden pinnoitteiden kohdalla ei homeriskiä havaittu. Betonisandwich-seinän mineraalivillan ulkopinnassa saavutettiin homeindeksi 3. Tutkimuksessa selvisi, että tässä pisteessä saavutetaan korkea homeindeksi riippumatta pintamateriaalista tai pinnoitettaessa vallinneesta suhteellisesta kosteudesta.</p> <p>Työssä tuotettiin rakenteiden tarkastelupisteiden homeindeksi- ja kosteuskuvaajat, jotka ovat työn liitteenä.</p>	
Avainsanat	Rakennusfysiikka, kosteus, simulointi, home, homeindeksi, WUFI, pintamateriaali

Author(s) Title	Sami Roikonen Coating criteria of concrete structures and numerical approximation of mould risk
Number of Pages Date	45 pages + 5 appendices 10 January 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Hannu Hakkarainen, Principal Lecturer Ilkka Jerkku, Head of Unit
<p>This thesis was done for Finnmap Consulting Oy, which is part of FMC Group. The reason for the study was suspicion that the current moisture requirements for coating concrete structures allow too humid concrete structures to be coated. The currently used requirements were developed only from the perspective of the material's resistance against moisture, not against mould growth.</p> <p>The objective of this thesis was to determine, whether the current concrete coating requirements according to SisäRYL 2013 pose an elevated risk of mould growth. All the tested coating requirements were found in SisäRYL 2013 Code of Building Practice. The tested structures were a concrete slab, a hollow core slab, a ground slab and a sandwich wall. The horizontal structures were coated with linoleum, vinyl and ceramic tiles. Sandwich wall was coated with ceramic tiles and paint. These make up the 11 different structures examined in the study.</p> <p>The study was carried out using simulation programs WUFI PRO 5.2 and WUFI 2D 3.3 to solve the heat and humidity related behavior of the examined structures. The simulated data was then analyzed with VTT-TUT mould growth model. VTT mould growth model was originally developed to predict mould growth on wooden materials. It was developed further in association with VTT Technical Research Centre of Finland (VTT) and Tampere University of Technology (TUT) to include various common construction materials. VTT-TUT mould growth model gives out a mould index for certain conditions and materials. This index varies between 0...6 with zero meaning no observable mould growth and six meaning 100% mould coat on material.</p> <p>As the result of this thesis, it was found out that the current coating requirements do not cause an elevated risk of mould growth. The outer surface of the sandwich wall's insulation will always gather mould, regardless of the coating material or the humidity during coating.</p> <p>The relative humidity and mould index charts for every structure are as appendage to this report.</p>	
Keywords	Building physics, moisture, simulation, mould, mould index, WUFI, coating material

## Sisällys

### Selitykset

1	Johdanto	1
2	Rakennusfysiikan teoriaa	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Lämpö	2
2.3	Kosteus	5
2.4	Betonin kosteus ja kuivuminen	10
3	Mikrobit rakennuksissa	12
3.1	Yleistä	12
3.2	Homemalli	13
4	Simulointiohjelmat	15
4.1	Yleistä	15
4.2	Simulointi WUFI-ohjelmilla	16
4.3	Ohjelmien laskennan verifiointi	23
5	SisäRYL 2013 pinnoitusvaatimukset	24
6	Simulointimallit, materiaalit, reunaehdot ja tulokset	27
6.1	Yleistä	27
6.2	Teräsbetonivälipohja	30
6.3	Ontelolaattavälipohja	32
6.4	Maanvarainen teräsbetoni-laatta	34
6.5	Betonisandwich-seinä	36
6.6	Materiaalien herkkyystarkastelu	40
7	Yhteenveto	42
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1. Laskennassa käytetyt materiaaliarvot	
	Liite 2. Teräsbetonivälipohjalaatan tulokset	



Liite 3. Ontelolaattavälipohjan tulokset

Liite 4. Maanvaraisen teräsbetoni-laatan tulokset

Liite 5. Betonisandwich-elementtiseinän tulokset

## Selitykset

Diffuusio	Diffuusio on fysikaalinen ilmiö, jossa kaasumolekyylit kulkeutuvat suuremmasta osapaineesta tai pitoisuudesta pienempää kohti.
Diffusiovastuskerroin	Diffusiovastuskerroin $\mu$ ilmoittaa ilman ja tarkasteltavan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyksien suhteen.
Hygroskooppisuus	Hygroskooppisuus tarkoittaa, että materiaali on huokoista ja pystyy luovuttamaan sekä vastaanottamaan kosteutta ilmastasta.
Höyrynsulku	Höyrynsulku on rakenteen materiaalikerroin, jonka tarkoitus on estää haitallinen diffuusio rakenteen läpi.
Johtuminen	Johtuminen on molekyylien liike-energian siirtymistä kiinteiden, kosketuksissa olevien materiaalien välillä.
Kapillaarisuus	Kapillaarisuus tarkoittaa nesteen kykyä liikkua hienojakoisessa tai huokoisessa aineessa koheesio- ja adheesiovoimien avulla.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus $\lambda$ ilmoittaa, kuinka paljon lämpöenergiaa siirtyy aikayksikössä pinta-alayksikön suuruiseen ja pituusyksikön paksuiseen rakenneosan läpi, kun pintojen lämpötilaero on yksikön suuruinen ja vallitsee stationääritila. Yksikkö on $(W/(m \cdot K))$ .
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin $U$ ilmoittaa, kuinka paljon lämpöenergiaa siirtyy aikayksikössä pinta-alayksikön suuruiseen rakenteen läpi, kun vallitsee stationääritila. Yksikkö on $(W/(m^2 \cdot K))$ .
Lämmönvastus	Lämmönvastus $R$ on lämmönläpäisykerroimen vastaluku. Yksikkö on $((m^2 \cdot K)/W)$ .

Ominaislämpökapasiteetti	Ominaislämpökapasiteetti $c_p$ ilmoittaa materiaalin lämmönsitomiskyvyn vakioaineessa ja -tilavuudessa. Ominaislämpökapasiteetti muuttuu materiaalin kosteudesta riippuen. Yksikkö on (J/(kg*K)).
$S_d$ -arvo	$S_d$ -arvo ilmoittaa, miten paksua ilmakerrosta aine vastaa diffuusionvastukseltaan. (m)
Suhteellinen kosteus	RH ( <i>Relative humidity</i> ) eli suhteellinen kosteus $\phi$ ilmoittaa ilman sisältämän kosteuden suhteen ilman suurimpaan mahdolliseen kosteuspitoisuuteen tietyssä lämpötilassa.
Stationääritila	Stationääritila tai jatkuvuustila tarkoittaa tilaa, jossa systeemin kosteus ja lämpö ovat saavuttaneet tasapainon, eivätkä ne muutu ajan kuluessa.
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v$ tai $\delta_p$ ilmoittaa, kuinka suuri vesimäärä siirtyy aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen rakennusosan läpi, kun vallitsee stationääritila ja rakennusosan eri puolilla olevien tilojen välillä on yksikön suuruinen vesihöyrynpitoisuusero (tai vesihöyryn osapaine-ero). Vesihöyrypitoisuuden ollessa potentiaalina käytetty symboli on $\delta_v$ ja yksikkö on (m <sup>2</sup> /s). Vesihöyryn osapaineen ollessa potentiaalina käytetty symboli on $\delta_p$ ja yksikkö on (kg/(m*s*Pa))
Vesihöyrynläpäisykerroin	Vesihöyrynläpäisykerroin $W_v$ tai $W_p$ ilmoittaa, kuinka suuri vesimäärä siirtyy aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen rakenteen läpi, kun rakenteen eri puolilla olevien tilojen välillä on yksikön suuruinen vesihöyrynpitoisuusero (tai vesihöyryn osapaine-ero). Vesihöyrypitoisuuden ollessa potentiaalina käytetty symboli on $W_v$ ja yksikkö on (m/s). Vesihöyryn osapaineen ollessa potentiaalina käytetty symboli on $W_p$ ja yksikkö on (kg/(m <sup>2</sup> *s/*Pa))
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastus $Z_v$ tai $Z_p$ on vesihöyrynläpäisykerroimen vastaluku. Yksiköt ovat $Z_v = (s/m)$ ja $Z_p = ((m^2*s*Pa)/kg)$

## 1 Johdanto

Rakennusten mikrobiongelmat ja sisäilman laatu ovat viimeaikoina herättäneet julkista keskustelua Suomessa. 2011 perustettiin Homepakolaiset ry sisäilmaongelmista kärsiville. Lukuisia rakennuksia on korjauskierteessä sisäilmaongelmien vuoksi. Mikrobikasvusto rakennuksessa voi pilata sisäilman ja aiheuttaa käyttäjille erilaisia terveydellisiä oireita. Nykytilanteen vuoksi on nähty tarpeelliseksi tarkastaa rakennusmääräysten ja -ohjeiden oikeellisuus. [1, s. 152.]

Tässä tutkimuksessa testataan nykyisiä betonirakenteiden päällystysvaatimuksia ja -ohjeistuksia betonin suhteellisen kosteuden kannalta. Näiden vaatimusten lähteenä käytetään ensisijaisesti SisäRYL 2013 -julkaisua. SisäRYL 2013:n ohjeistukset sallivat betonilaatan päällystämisen esimerkiksi epoksinnoitteella, kun laatan suhteellinen kosteus on jopa 97 %. [2, s. 283.]

Työ toteutetaan seuraavasti: Tarkasteltava rakenne mallinnetaan simulointiohjelmalla, josta tuloksena saadaan tietyllä aikavälillä suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot tarkastelupisteissä. Simuloinnissa käytetään WUFI PRO 5 tai WUFI 2D -ohjelmia, rakennemallin vaatimuksista riippuen. Seuraavassa vaiheessa tarkastelupisteen lämpö- ja kosteusdata siirretään Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) ja Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) yhteistyössä laadittuun homemalliin, jonka avulla rakenteen homeriskiä voidaan arvioida laskennallisesti. Homemalli antaa tulokseksi homeindeksin, joka kuvaa rakenteen homehtumisastetta. Työssä ei ajan ja resurssien puutteen vuoksi tehdä laboratoriokokeita. [3, s. 59.]

Tutkimuksessa tarkastellaan neljää eri rakennetyyppiä: Ontelolaatta- ja teräsbetoninen massiivilaattaväli- ja teräsbetoninen alapohja. Nämä rakenteen päällystetään kolmella erilaisella pintamateriaalilla: muovimatolla, linoleumimatolla ja keraamisella laatoituksella. Lisäksi tarkastellaan betonisandwich-seinää, joka päällystetään keraamisella laatoituksella ja maalilla.

Työn tuloksena saadaan käsitys, ovatko nykymääräysten mukaan tehdyt rakenteet rakennusfysikaalisesti toimivia vai ovatko ne alttiita mikrobikasvustolle.

## 2 Rakennusfysiikan teoriaa

### 2.1 Yleistä

Rakennusfysiikka on termodynamiikan osa-alue, joka keskittyy rakennetun ympäristön ymmärtämiseen lämmön, kosteuden, akustiikan ja valon toiminnan kannalta. Tässä työssä rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta ovat keskeisessä asemassa, joten muut osa-alueet rajataan teoriaosiosta pois. Jokaisen rakennusalan insinöörin tulisi tuntea rakennusfysiikan perusteet, sillä lämmön, kosteuden ja ilman käyttäytymisen ymmärtäminen on perusedellytys, jotta rakennuksesta saada aikaan turvallinen, terveellinen ja miellyttävä elinympäristö. [4, s. 1.]

Rakennusfysiikassa on huomioitava, että kaikki muuttuvat suureet ovat yhteydessä ja vaikuttavat toisiinsa. Esimerkiksi haihtuva vesi viilentää alustaansa ja aiheuttaa ilmavirtauksia, joiden mukana siirtyy lämpöä ja kosteutta. Tästä syystä monet laskelmat ovat erittäin monimutkaisia ilman huomattavia yksinkertaistuksia, ja käsinlaskenta vaatii todella paljon aikaa ja vaivaa. Rakennusfysiikassa perusilmiöt, kuten lämmönsiirtyminen, tapahtuvat hyvin suppeissa olosuhteissa: noin yhden atmosfäärin paineessa (101325 Pa) ja -40...80 °C lämpötilassa. Skaala saa ttaa vaihdella hieman kohteesta kohteeseen, mutta perusoletuksen mukaan lämpötila ja paine vaihtelevat niin vähän, että monia yksinkertaistuksia voidaan tehdä laskennan helpottamiseksi. Esimerkiksi ilman tilavuuden vaihtelu lämmön ja paineen vaikutuksesta jätetään yleensä huomiotta. [5, s. 3.]

### 2.2 Lämpö

Lämpö on fysikaalinen suure, joka voidaan määritellä atomien sisäiseksi kineettiseksi energiaksi. Tämä lämpöenergia voidaan havaita kappaleissa muun muassa niiden emittoiman elektromagneettisen säteilyn perusteella, faasin ja tilavuuden muutoksena ja tietenkin myös lämpötuntemuksena ihon välityksellä. [4, s. 11.]

Lämmön siirtyminen johtuu lämpötilaeroista. Lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan ja lämpöenergia kuumista kappaleista siirtyy kohti kappaleita, joiden lämpöenergiataso on matalampi. Lämpöenergia voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiolla ja

säteilyllä. Lämmönsiirtymismuodot eivät ole toisiaan poissulkevia – useimmiten osa niistä tapahtuu samanaikaisesti. [5, s. 4.]

### *Johtuminen*

Johtuminen tarkoittaa kosketuksissa olevien kappaleiden välistä lämpöenergian siirtoa. Tämä ilmiö johtuu molekyylien sisäisestä värähtelystä. Tämä sisäinen värähtely ei kuitenkaan aiheuta molekyylien liikettä. Eräs esimerkki lämmön siirtymisestä johtumalla on metallilusikka kuumassa keitossa. Lämpöenergia johtuu lusikkaa pitkin kuumasta päästä kylmään päähän, vaikka lusikan toinen pää ei ole kosketuksissa keiton kanssa. [4, s. 11.]

Lämmön johtumista yksiulotteisessa tapauksessa voidaan kuvata Fourierin lailla.

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

missä,

$q$  on lämpövirran tiheys ( $\text{W/m}^2$ )

$\lambda$  on ainekohtainen lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )

$T$  on lämpötila (K)

$x$  on etäisyys (m)

Yllä olevasta kaavasta ilmenee, että lämpö virtaa laskevan lämpötilan suuntaan eli gradientin vastaisesti. Lisäksi tähän vaikuttaa materiaalikohtainen lämmönjohtavuus. Lämmöneristeenä käytetyillä materiaaleilla on pieni lämmönjohtavuus.

### *Konvektio*

Konvektio tarkoittaa aineen virtaamista lämpötilaerojen seurauksena. Rakennusfysiikassa konvektion väliaineena on yleensä ilma. Rakennusfysiikassa tunnetaan luonnollinen ja pakotettu konvektio. Pakotettu konvektio tarkoittaa väliaineen liikettä ulkopuolisen voiman vaikutuksesta, esimerkiksi ilmanvaihdon avulla. Luonnollinen konvektio puolestaan on ilman tai muun väliaineen liikettä puhtaasti lämpötila- tai paine-eroista johtuen. Puhtaasti luonnollinen konvektio on rakennuksissa harvinaista ja yleensä niissä esiintyy jokin yllämainittujen yhdistelmä. [4, s. 12; 6, s. 13.]

Molekyyalitasolla konvektiossakin varsinainen lämpöenergian siirtyminen tapahtuu johtumalla, koska väliaineen molekyylit tulevat kosketuksiin kylmempien molekyyliden kanssa, jolloin lämpöenergia siirtyy. [4 s. 12.]

### *Säteily*

Säteily tarkoittaa lämmön siirtymistä elektromagneettisen aaltoliikkeen seurauksena. Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet emittoivat tätä elektromagneettista säteilyä jatkuvasti. Säteily on lämmönsiirtymistavoista ainoa, joka ei tarvitse väliainetta. [4, s. 12; 5, s. 4; 6, s. 12.]

Lämmönsiirrossa osa säteilystä absorboituu ja osa heijastuu. Kappaleiden emissiivisyys ilmaisee, kuinka suuren osan säteilystä kappaleen pinta absorboi ja heijastaa. [7, s. 462.]

Kappaleen emittoimaa säteilyä voidaan ideaalitapauksessa kuvata kaavalla 2.

$$Q_m = \sigma * T^4 \quad (2)$$

missä,

$Q_m$  on säteilyteho (W/(m<sup>2</sup>\*K))

$\sigma$  on Stefan-Boltzmann vakio  $5,67 \cdot 10^{-8}$  (W/(m<sup>2</sup>\*K<sup>4</sup>))

$T$  on lämpötila (K)

Kappaleiden todellinen säteilyteho on kuitenkin aina pienempi kuin ideaalitapauksen niin kutsutun mustan kappaleen. Todellisen ja ideaalisen säteilytehon suhdetta kutsutaan emissiviteetiksi  $\epsilon$ . Tällöin todelliselle säteilyteholle saadaan seuraava kaava: [6, s. 12; 7, s. 462.]

$$Q_s = \epsilon * \sigma * T^4 \quad (3)$$

missä,

$Q_m$  on säteilyteho (W/(m<sup>2</sup>\*K))

$\epsilon$  on pinnan emissiviteetti (-)

$\sigma$  on Stefan-Boltzmann vakio  $5,67 \cdot 10^{-8}$  (W/(m<sup>2</sup>\*K<sup>4</sup>))

$T$  on lämpötila (K)

Säteilyn osuessa pintaan, tietty osa säteilystä absorboituu ja osa heijastuu. Eräissä materiaaleissa, kuten esimerkiksi lasissa, osa säteilystä läpäisee materiaalikerroksen. Näitä ominaisuuksia kuvataan yleisesti seuraavilla muuttujilla: heijastuskerroin on  $\rho$ , absorptiokerroin on  $\alpha$ , ja läpäisykerroin on  $\tau$ . Näiden muuttujien suhteelle pätee seuraava kaava: [6, s. 13.]

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (4)$$

Käytännössä kaavaa 4 voidaan yksinkertaistaa niin, että  $\rho=\alpha$ , eli emissiviteetti on yhtä suuri kuin absorptiokerroin [6, s. 13].

### 2.3 Kosteus

Rakennukseen kohdistuvia ulkoisia kosteusrasituksia ovat muun muassa sade, ilman-kosteus, pinta-, vajo- ja pohjavesi sekä kapillaarivesi. Sade ilmenee vetenä, lumena tai jäänä. Sateen rasitus riippuu voimakkaasti vuodenajasta ja paikasta. On arvioitu, että tulevaisuudessa sateen määrä tulee nousemaan Suomessa. [5, s. 87-88; 8, s. 37-38.]

Sisäisiä kosteusrasituksia ovat puolestaan rakennekosteus ja mahdolliset putkivuodot sekä rakennuksen sisäilmaan tuleva kosteus ihmisistä, eläimistä ja yleisestä vedenkäsitteystä rakennuksessa. Lisäksi ulko-olosuhteet vaikuttavat sisäilmaan ilmanvaihdossa tulevan korvausilman toimesta. Rakennekosteus on rakennemateriaaleihin valmistus- ja rakennusvaiheissa sitoutunutta kosteutta. Rakennekosteusrasitusta voidaan vähentää tarkalla kosteudenhallinnalla rakennusvaiheessa, johon liittyy muun muassa laadukas suojaus säätä vastaan. [5, s. 87-88.]

#### *Ilman kosteus*

Ilman kosteudella tarkoitetaan ilmassa olevaa vesihöyryn määrää. Se voidaan ilmoittaa joko vesihöyryn osapaineena (Pa), ilman absoluuttisena vesihöyryn määränä ( $\text{g/m}^3$ ) tai suhteellisena kosteutena (%). Ilman suhteellinen kosteus tarkoittaa vesihöyryn tai osapaineen määrää verrattuna sen hetkiseen enimmäisarvoon eli kyllästyskosteuteen. Suhteellinen kosteus voidaan siis ilmaista seuraavasti:



$$\varphi = \frac{p}{p_k} * 100 \% \quad (5)$$

missä,

$\varphi$  on suhteellinen kosteus (%)

$p$  on vesihöyryn osapaine tai absoluuttinen kosteus (Pa) tai (g/m<sup>3</sup>)

$p_k$  on vesihöyryn kyllästymiskosteus (Pa) tai (g/m<sup>3</sup>)

Kun suhteellinen kosteus saavuttaa kyllästymisasteen, ei kyseisissä olosuhteissa ilmaan voi sitoutua enempää vesihöyryä. Tällöin vesihöyry tiivistyy nestemäiseksi vedeksi rakenteen pintaan eli vesihöyry kondensoituu. Ilman kyky varastoida vesihöyryä on suhteessa ympäristön paineeseen ja lämpötilaan. Rakennusfysiikassa voidaan kuitenkin olettaa paineen vaihtelun olevan mitättömän pieni, jolloin on edullista huomioida vain lämpötila. Kylläisen ilman vesihöyrynpitoisuuden ja lämpötilan välille ei ole vielä keksitty täsmällistä matemaattista suhdetta, mutta kaavassa 6 on tämän hetken tarkin approksimaatio. Kaava on voimassa lämpötila-alueella 0...50 °C ja kuviossa 1 on sen graafinen esitys. [4, s. 144; 6, s. 43.]

$$p_k = p_{c,k} * e^{(2,3026 * k * (1 - \frac{T_c}{T}))} \quad (6)$$

missä,

$p_k$  on kylläisen vesihöyryn osapaine (Pa)

$p_{c,k}$  on 217,5\*10<sup>5</sup> Pa, vesihöyryn osapaine kriittisessä lämpötilassa

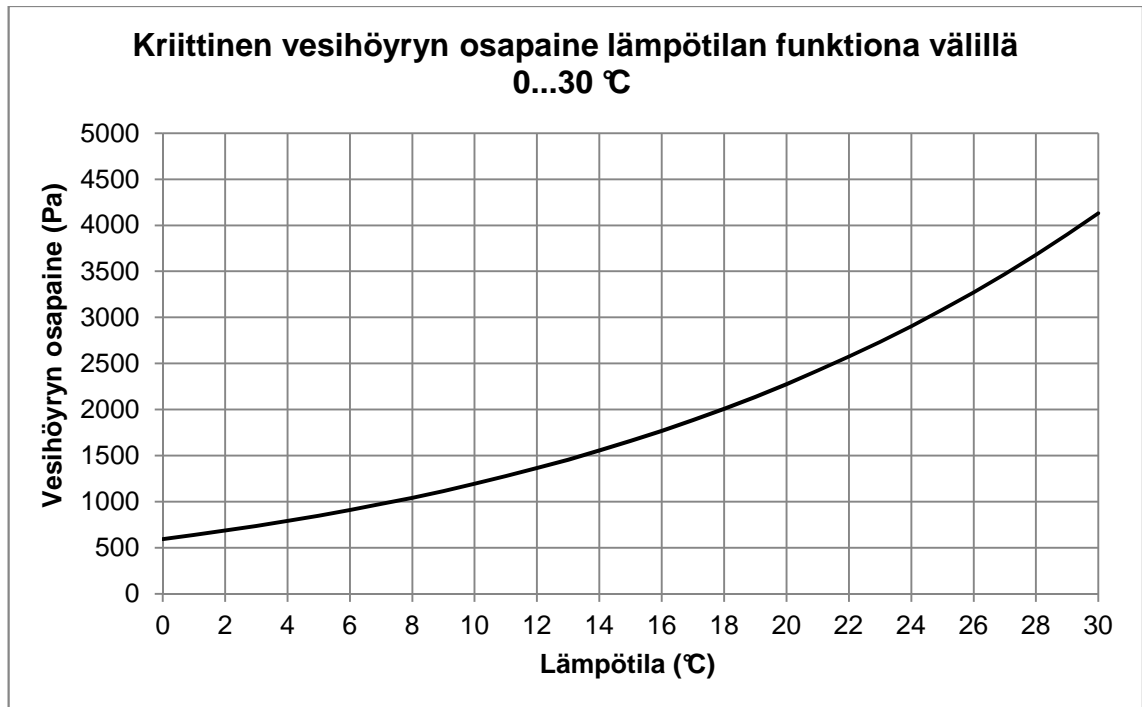
$T_c$  on 647,4 K, veden kriittinen lämpötila

$k$  on lämpötilasta riippuva kerroin, joka lasketaan kaavalla 7

$$k = 4,39553 - 6,2442 * \left(\frac{T}{1000}\right) + 9,953 * \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 5,151 * \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (7)$$

missä,

$T$  on lämpötila (K)



Kuvio 1. Kaavan 6 kuvaaja välillä 0...30 °C.

#### *Vesihöyryn konvektio*

Lämmön tapaan myös ilmassa oleva vesihöyry voi siirtyä paikasta toiseen konvektion avulla. Lämpötila- ja paine-erot aiheuttavat ilmaliikkeitä, joiden mukana vesihöyry liikkuu. Vesihöyryn konvektion aiheuttamaa kosteuslisää voidaan kuvata kaavalla 8. [5, s. 93.]

$$G = R_a * (v_k - v_p) \quad (8)$$

missä,

$G$  on kosteusvirta

$R_a$  ilmavirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$v_k$  on korvausilman kosteuspitoisuus ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$v_p$  on poistoilman kosteuspitoisuus ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

#### *Vesihöyryn diffuusio*

Vesihöyryn diffuusio tarkoittaa sitä, että kosteus liikkuu ilmassa vain pitoisuuserojen avulla. Vesihöyryn diffuusiota kuvataan Fickin lailla, joka on esitetty kaavassa 9. [5, s. 93.]

$$g = -D \frac{dv}{dx} \quad (9)$$

missä,

$g$  on kosteusvirta

$D$  vesihöyryn diffuusiokerroin (potentiaalina vesihöyryn pitoisuus) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$v$  on kosteuspitoisuuden ero tietyllä etäisyydellä ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$x$  on etäisyys (m)

Kosteus liikkuu myös rakennusmateriaaleissa diffuusion avulla. Tällöin kaavasta 9 korvataan  $D$  materiaaliikohtaisella vesihöyryn läpäisevyydellä  $\delta_v$ . Lausekkeessa yksiköt eivät muutu edellä mainitusta muutoksesta huolimatta.

Eräs yleinen tapa ilmoittaa materiaalin diffuusionvastusta on diffuusionvastuskerroin  $\mu$ . Tämä yksikkö ilmoittaa materiaalin vesihöyryn läpäisevyyden suhteessa paikallaan olevaan ilmaan. Mitä suurempi diffuusionvastuskerroin, sitä voimakkaammin materiaali vastustaa vesihöyryn diffuusiota. Diffuusionvastuskerrointa voidaan kuvata kaavalla 10.

$$\mu = \frac{\delta_i}{\delta} \quad (10)$$

missä,

$\mu$  on diffuusionvastuskerroin (-)

$\delta_i$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys  $188 \cdot 10^{-12}$  ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ )

$\delta$  on tarkasteltavan materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ )

Toinen yleisesti käytetty yksikkö on niin sanottu  $S_d$ -arvo. Tämä ilmoittaa, kuinka paksua ilmakerrosta materiaalikerrosta vastaa vesihöyrynvastukseltaan. Esimerkiksi höyrynsulkumuovi, jonka  $S_d$ -arvo on 100 m vastaa vesihöyrynvastukseltaan 100 metrin paksuista ilmakerrosta. Tämä on varsinkin höyrynsulkumuovien keskuudessa yleisesti käytetty yksikkö.

### *Kapillaari-imu*

Kapillaari-imu on ilmiö, jonka aiheuttaa veden koheesiovoima ja pintajännitys. Kosteus voi liikkua kapillaarisesti vain huokoisissa aineissa, kuten esimerkiksi betonissa ja puussa. Kapillaarisesti siirtymistä varten aineen täytyy olla kosketuksissa veden kanssa. Kapillaari-imua voidaan kuvata kaavalla 11. [5, s. 99.]

$$p = \frac{2\sigma}{r} * \cos(\theta) \quad (11)$$

missä,

$p$  on kapillaaripaine

$\sigma$  on veden pintajännitys 0,073 (N/m)

$r$  on putken halkaisija (m)

$\theta$  on veden ja putken välinen reunakulma

Tavallisissa tapauksissa voidaan olettaa kulman  $\theta$  olevan 0. Tällöin kapillaari-imu on riippuvainen vain pintajännityksestä ja putken halkaisijasta. Kaavasta 11 voikin päätellä, että mitä ohuempi putki, sitä suurempi kapillaari-imu ja samaten vesi nousee putkessa korkeammalle. Kaavasta 11 voidaan johtaa kaava 12, joka ilmoittaa nesteen kapillaarisen nousukorkeuden putkessa. [5, s. 99.]

$$h = \frac{2\sigma}{g * \rho * r} \quad (12)$$

missä,

$h$  on veden kapillaarisen nousun korkeus (m)

$\sigma$  on veden pintajännitys 0,073 (N/m)

$g$  on putoamiskiihtyvyys 9,81 (m/s<sup>2</sup>)

$\rho$  on nesteen tiheys, veden tapauksessa 1000 (kg/m<sup>3</sup>)

$r$  on putken halkaisija (m)

Kaavoista 11 ja 12 on huomioitava, että vaikkakin ne kuvaavat kapillaari-ilmiötä ympyräputkissa, voidaan tuloksia soveltaa kapillaarinousun arviointiin huokoisissa aineissa, kuten esimerkiksi betonissa [5, s. 99-100].

Kapillaarisesti imetyn nesteen määrää kappaleessa voidaan kuvata kaavalla 13. Kaava ilmoittaa imeytyneen nesteen määrän ajan funktiona. [5, s. 101.]

$$G = A * \sqrt{t} \quad (13)$$

missä,

$G$  on imeytynyt nestemäärä (kg/m<sup>2</sup>)

$A$  on materiaali- ja kosteuskohtainen kapillariteettikerroin (kg/(m<sup>2</sup>\*√t))

$t$  on aika (s)

Kapillaarinesteen tunkeutumisvyöhytettä kappaleessa voidaan tarkastella kaavan 14 avulla [5, s. 101].

$$x = B * \sqrt{t} \quad (14)$$

missä,

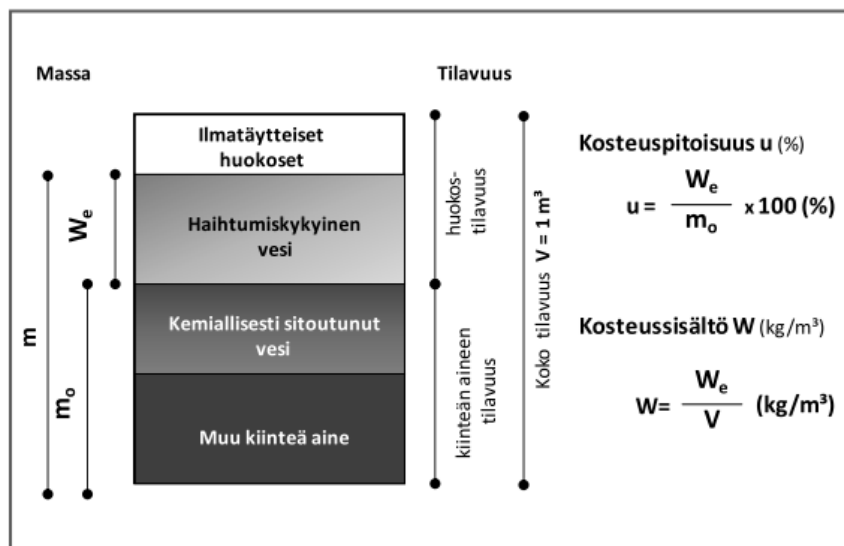
$x$  on nesteerintaman sijainti kappaleessa (m)

$B$  on materiaalikohtainen nesteen läpäisykerroin (m/ $\sqrt{s}$ )

$t$  on aika (s)

## 2.4 Betonin kosteus ja kuivuminen

Betoni on hygroskooppinen aine, eli se sitoo ja luovuttaa ympäristöönsä kosteutta. Täydellisessä hydrataatiossa betonin vesimäärästä sitoutuu vain noin 25 % sementtiaineksen painosta. Tämä tarkoittaa sitä, että betonimassaan jää paljon kemiallisesti sitoutumatonta vettä, joka haihtuu ympäröivään ilmaan. Haihtumista tapahtuu niin kauan, kunnes betoni saavuttaa hygroskooppisen tasapainon, eli betonin huokosten ilman suhteellinen kosteus on sama kuin ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Betonin periaatteellista koostumusta tarkastellaan kuviossa 2. Eri betonilaatujen ominaisuudet voivat vaihdella suuresti, joten kuviossa 2 ei esitetty lukuarvoja eri osien suhteille. [9, s. 432.]

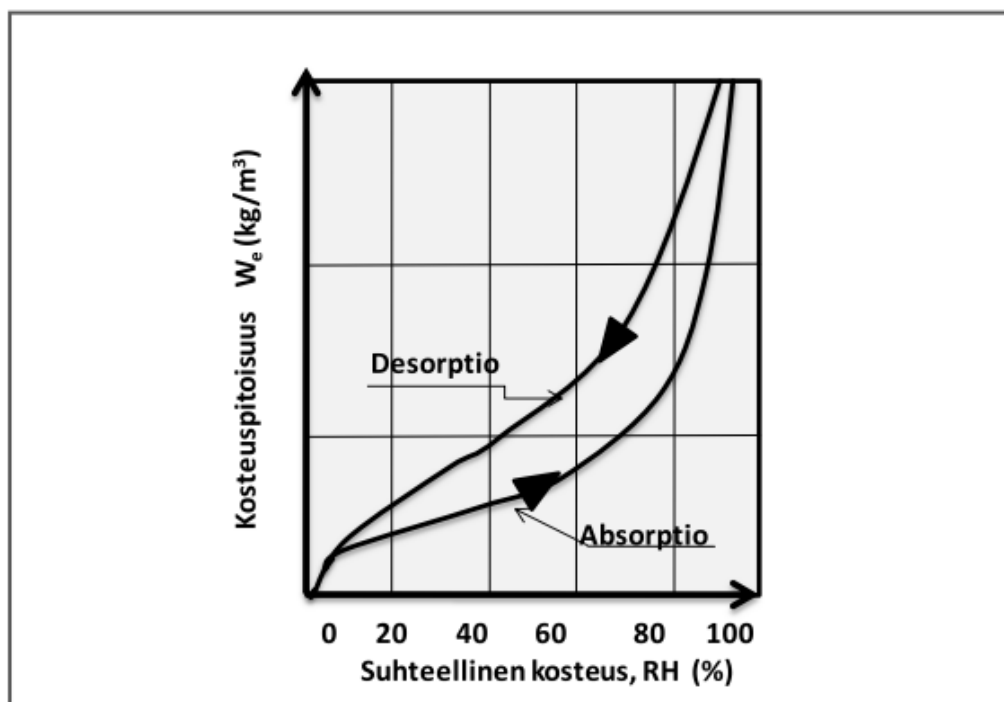


Kuvio 2. Betonin tilavuuden jakautuminen kiinteään aineeseen, nesteeseen ja huokosiin. [10 s.14.]

Betonin kuivumiseen vaikuttavat monet tekijät. Näitä ovat muun muassa ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila, ilmavirtaukset sekä betonin ominaisuudet ja jälkihoito. Betonikerroksen paksuus ja mahdollisuus kahdensuuntaiseen kuivumiseen vaikuttavat voimakkaasti kuivumisajan pituuteen. Betonikappaleen kuivuminen voi tilanteesta riippuen kestää viikosta vuosiin. [9, s. 432-433.]

Yleisesti ideaalina ilman suhteellisenä kosteutena pidetään 50 %. Tämä johtuu siitä, että betonin kuivuessa sen vesihöyryn läpäisevyys laskee jyrkästi. Tästä seuraa se, että kosteammista osista virtaava kosteuden liike hidastuu huomattavasti kuivassa pintakerroksessa. [9, s. 432-433.]

Betonissa ja huokoisissa materiaaleissa suhteellisen kosteuden ja vesipitoisuuden suhdetta voidaan kuvata sorptiokäyrällä eli tasapainokosteuskäyrällä. Kuvio 3 on esimerkki sorptiokäyrästä. [5, s. 91-92.]



Kuvio 3. Sorptiokäyrä, josta ilmenee hystereesi-ilmiö. [10 s.14.]

Kuviosta 2 ilmenee hygroskooppisille aineille tyypillinen hystereesi-ilmiö. Hystereesi tarkoittaa sitä, että kuivuessaan materiaalin absoluuttinen nestepitoisuus on suurempi kuin mitä se voisi adsorboida ympäröivästä ilmasta. [5, s. 91-92.]

### 3 Mikrobit rakennuksissa

#### 3.1 Yleistä

Mikrobeja on kaikkialla maapallolla. Ne selviävät jopa kaikkein karuimmissa olosuhteissa, kuten esimerkiksi meren pohjassa niin sanotuissa mustissa savuttajissa tai muuten elottomissa suolajärvissä. Tämän takia on selvää, että mikrobit selviävät myös rakennetussa ympäristössä. Erilaisia mikrobeja on hyvin paljon ja niiden ominaisuudet eroavat toisistaan paljon. Tästä syystä tässä työssä käsitellään vain tyypillisiä Suomen olosuhteissa viihtyviä, rakennuksista löydettäviä mikrobeja. [1, s. 146; 11; 12, s. 152-154.]

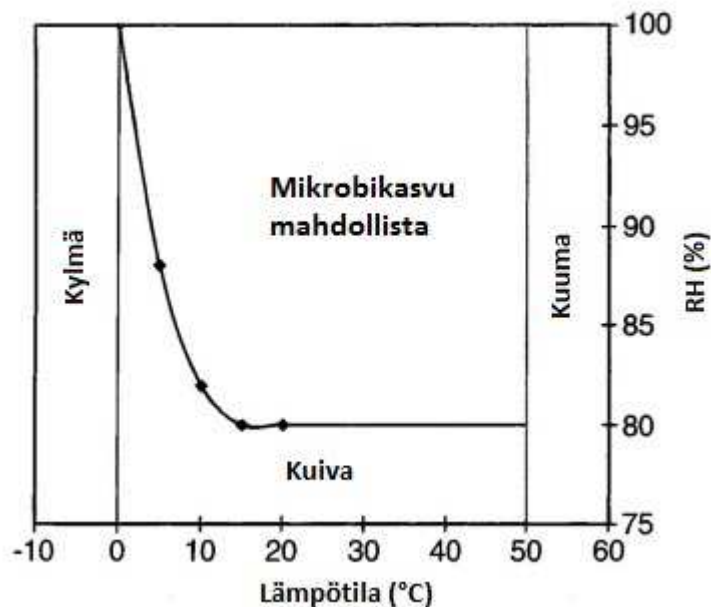
Asunnoista löydetään usein pienissä määrin erilaisia harmittomia mikrobeja. Yksittäiset mikrobihavainnot eivät aina ole merkki terveysriskistä. Eräät mikrobit ovat allergisoivia ja tuottavat allergisoivia itiöitä sekä aineenvaihduntansa tuloksena mahdollisesti toksineja. Tällaisissa tapauksissa terveyshaitta on mahdollinen. [1, s. 146.]

Varsinaista mikrobikasvustoa ei synny, elleivät sen vaatimukset täyty ravinnon, lämpötilan, kosteuden, valon, happipitoisuuden ja happamuuden osalta. Olosuhteista ja lajista riippuen sienet ja bakteerit ovat ravintoedellytyksiltään yleensä vaatimattomia: Jopa pelkkä pöly betonin tai teräksen pinnalla voi sisältää tarpeeksi ravinteita mikrobien kasvun käynnistymiseen. Tällöin mikrobikasvua saattaa ilmetä muuten homehtumattomien materiaalien pinnoilla. [1, s. 146; 11; 12, s. 152-154.]

Mikrobien kasvu tapahtuu yleensä lämpötila-alueella 5...40 °C ja optimaalinen kasvu alueella 20...30 °C. Tämä tekee asuinrakennuksista erittäin hyviä elinympäristöjä mikrobeille lämpötilan ja ravinnon kannalta. Mikrobikasvun alkamiseen vaaditaan useimmiten kosteutta 80...100 RH %. Nyrkkisääntönä pätee: Mitä korkeampi kosteuspitoisuus, sitä suurempi todennäköisyys mikrobikasvuston muodostumiselle. [1, s. 146; 3, s. 57-58.]

Yleensä yllämainitut kaksi vaatimusta ovat ratkaisevassa asemassa tehtäessä simuloiteja ja arvioiteja mikrobikasvuston kasvusta. Voidaan kuitenkin todeta suhteellisen kosteuden olevan kriittisessä asemassa, sillä tavallisessa käytössä oleva rakennus on lämpötilan kannalta hyvä kasvualusta mikrobeille, kun taas rakennusmateriaalien ja

sisäilman suhteellinen kosteus on huomattavasti alle 80 %. Kuviossa 4 on esitetty mikrobikasvuston olosuhdevaatimukset lämmön ja kosteuden suhteen.



Kuvio 4. Homeen kasvun edellyttämät olosuhteet männyn pintapuussa (kuvaa muokattu). [3, s.58]

### 3.2 Homemalli

Alun perin puulle kehitettyä VTT homemallia on kehitetty ja paranneltu yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston kanssa. Tämän tutkimustyön tuloksena syntyi VTT-TTY homemalli, joka on huomattavasti aikaisempaa homemallia kattavampi. Paranneltu malli kattaa puun lisäksi useita yleisiä rakennusmateriaaleja. Homemallin kehitys jatkuu paraikaa ENERSIS-projektin muodossa. [13, s. 55-57.]

Homemalli kuvaa homeen kasvua erilaisten materiaalien pinnoilla. Erilaisten materiaalikertoimien, kosteuden ja lämmön perusteella kaavojen tuloksena saadaan homeindeksi, joka vaihtelee välillä 0...6. Homeindeksiluokitus perustuu tarkasteltavan materiaalin pinnan visuaaliseen kuntoon. Homeen kasvu alkaa, kun pinta saavuttaa homeindeksitason 1. Homeindeksiluokitus on selitetty taulukossa 1. [13, s. 55-57.]



Taulukko 1. Homeindeksin luokitusperusteet. [13, s. 57]

Homeindeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, puhdas pinta.
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmasto alle 10 % alasta (itiöitä alkaa muodostua) TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10-50 % alasta TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava runsas kasvu, rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan lisäksi homeindeksin määrittämiseen tarvitaan materiaalikohtainen homehtumisherkkyysluokka. VTT-TTY homemallia laadittaessa tutkitut rakennusmateriaalit luokiteltiin neljään herkkyyssluokkaan: hyvin herkkään, herkkään, kohtalaisen kestävään ja kestävään. Nämä luokitukset on selitetty taulukossa 2 ja ne pätevät sekä kasvunopeusluokkaan että homeen maksimimääräluokkaan. Mikäli tarkastellaan kahden materiaalin rajapintaa, tulee käyttää herkemman materiaalin kasvunopeusluokkaa. [14.]

Taulukko 2. Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyysluokat. [13, s. 58]

Homehtumis-herkkyyssluokka	Rakennusmateriaalit
Hyvin herkkä HHL1	Sahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä HHL2	Höylätty kuusi, paperipintaiset tuotteet, puupohjaiset levyt, kipsilevy
Kohtalaisen kestävä HHL3	Tiilet, sementti- ja muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, mineraalivillat
Kestävä HHL4	Lasi ja metalli, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet, alkalinen uusi betoni

Tämän lisäksi eri materiaalit jaettiin kolmeen eri taantumaluokkaan: merkittävä, kohtalainen ja vähäinen taantuma. Nämä luokat määrittelevät sen, kuinka nopeasti homekasvustolle epäsuotuisina aikoina homeindeksi laskee. Taantumaluokat määräytyvät materiaalin homehtumisherkkyysluokan mukaan. Taantumaluokkien ja homehtumisherkkyysluokkien yhteys on esitetty taulukossa 3. [13, s. 58; 14.]

Taulukko 3. Homehtumisherkkyyssuokkien ja taantumaluokkien yhteys.[13, s. 57]

Homehtumisherkkyyssuokka	Homekasvun taantumaluokka
Hyvin herkkä HHL1	Merkittävä taantuma HTL2
Herkkä HHL2	Kohtalainen taantuma HTL3
Kohtalaisen kestävä HHL3	Vähäinen taantuma HTL4
Kestävä HHL4	Vähäinen taantuma HTL4

VTT-TTY homemallia käytettäessä on huomioitava, että sen perusteella ei voi arvioida tietyn homelajin kasvua tarkasteltavassa kohteessa. Homemalli ei siis ota kantaa homekasvuston toksisuuteen ja tämän vuoksi tarkastelusta ei voida johtaa yhteyttä terveysriskiin, vaikka homeindeksi kasvaisi arvoa 1 suuremmaksi. [13, s. 57.]

VTT-TTY homemallin laskennallisen osuuden kaavoista ja niissä käytetyistä parametreistä voi lukea tarkemmin lähiaikoina julkaistavasta Tampereen teknillisen yliopiston talonrakennustekniikan tutkimusraportista 143. Tämän tutkimuksen aikana loppuraporttia ei ollut vielä julkaistu, mutta käytössä oli tutkijaryhmältä saatu, taulukkolaskentaohjelmaan rakennettu pohja, jonka avulla tutkimuksen homeindeksilaskenta voitiin suorittaa.

## 4 Simulointiohjelmat

### 4.1 Yleistä

Simulointiohjelmat ovat lähes välttämätön apuväline rakennusten fysikaalisen toiminnan suunnittelussa. Rakennusfysikaalisten laskelmien suorittaminen käsin vaatii hyvin paljon aikaa, varsinkin monimutkaisten rakenteiden kohdalla. Toinen mahdollinen tutkimusmetodi olisi empiirinen tutkimus, joissa rakennetaan mallirakennus, jonka toimintaa ja kuntoa seurataan. Tämä on yksittäisiä kohteita ajatellen erittäin kallis ja vaivalloinen tapa selvittää rakennuksen fysikaalinen toiminta, vaikkakin se olisi tarkin mahdollinen menetelmä.

Simulointiohjelmaa hyödynnetessä on varmistuttava, että käyttäjä osaa käyttää sitä ja tuntee sen toimintaperiaatteet. Lisäksi materiaali- ja olosuhdearvot sekä reunaehdot tulee valita malleille tarkasti. Vaikka simulointiohjelmat ovat äärimmäisen hyödyllisiä työkaluja, on kuitenkin muistettava, että niissä on epätarkkuuksia: laskenta perustuu

approksimaatioihin ja nykyiseen parhaaseen tietämykseen rakennusfysiikasta. Materiaalit oletetaan homogeenisiksi ja rakenteet virheettömiksi. Lisäksi tietyt ohjelmat pystyvät ottamaan laskennassa huomioon vain rajallisen määrän fysikaalisia ilmiöitä. Tässä tutkimuksessa käytetyt WUFI-ohjelmat eivät esimerkiksi pysty ottamaan ilmavirtauksia huomioon. [15; 16.]

WUFI-ohjelmien nimi tulee sanoista "Wärme- und Feuchtetransport instationär", mikä vapaasti suomennettuna tarkoittaa ajasta riippuvaista lämmön ja kosteuden liikettä. WUFI-ohjelmia on useita erilaisia ja tässä työssä käytetään niistä kahta: WUFI PRO 5 ja WUFI 2D. WUFI ohjelmistot on kehittänyt saksalainen Fraunhofer-instituutin rakennusfysiikan osasto. Fraunhofer-instituutissa tutkitaan kattavasti rakennusfysiikan eri osa-alueita. [17.]

#### 4.2 Simulointi WUFI-ohjelmilla

WUFI PRO -ohjelma on tarkoitettu yksiulotteisten rakennelmien kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan tarkasteluun epästationääritilassa. Tätä ohjelmaa käytettiin useimpiin tutkimuksen simulointeihin. WUFI 2D -ohjelmaa käytettiin ontelolaattarakenteiden mallintamiseen. WUFI PRO -ohjelmaa käytettiin siksi, että monet tutkittavat rakenteet pystyttiin mallintamaan yksiulotteisena. Tästä on etua siinä mielessä, että yksiulotteinen laskenta vaatii vähemmän aikaa ja tiedostojen käsittely on kevyempää. Ohjelmien yhteensopivuus verifioitiin ennen simuloinnin aloittamista. Ohjelmien versiot olivat WUFI PRO 5.2 ja WUFI 2D 3.3. [15; 16.]

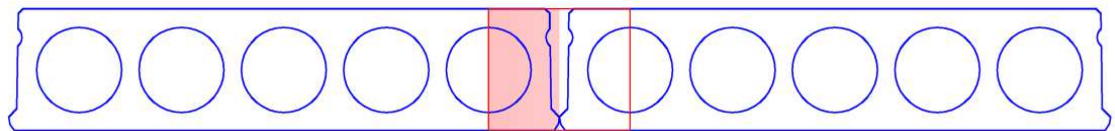
Tulevissa luvuissa keskitytään vain WUFI 2D -ohjelman käyttöön, sillä itse mallintaminen ei eroa WUFI 2D ja WUFI PRO -ohjelmien välillä juurikaan. 2D-versiossa on tietenkin ylimääräisen ulottuvuutensa vuoksi enemmän työstämistä, mutta mallintamisen periaatteet eivät ole yksiulotteisesta versiosta muuttuneet. [15; 16.]

##### *Mallintaminen*

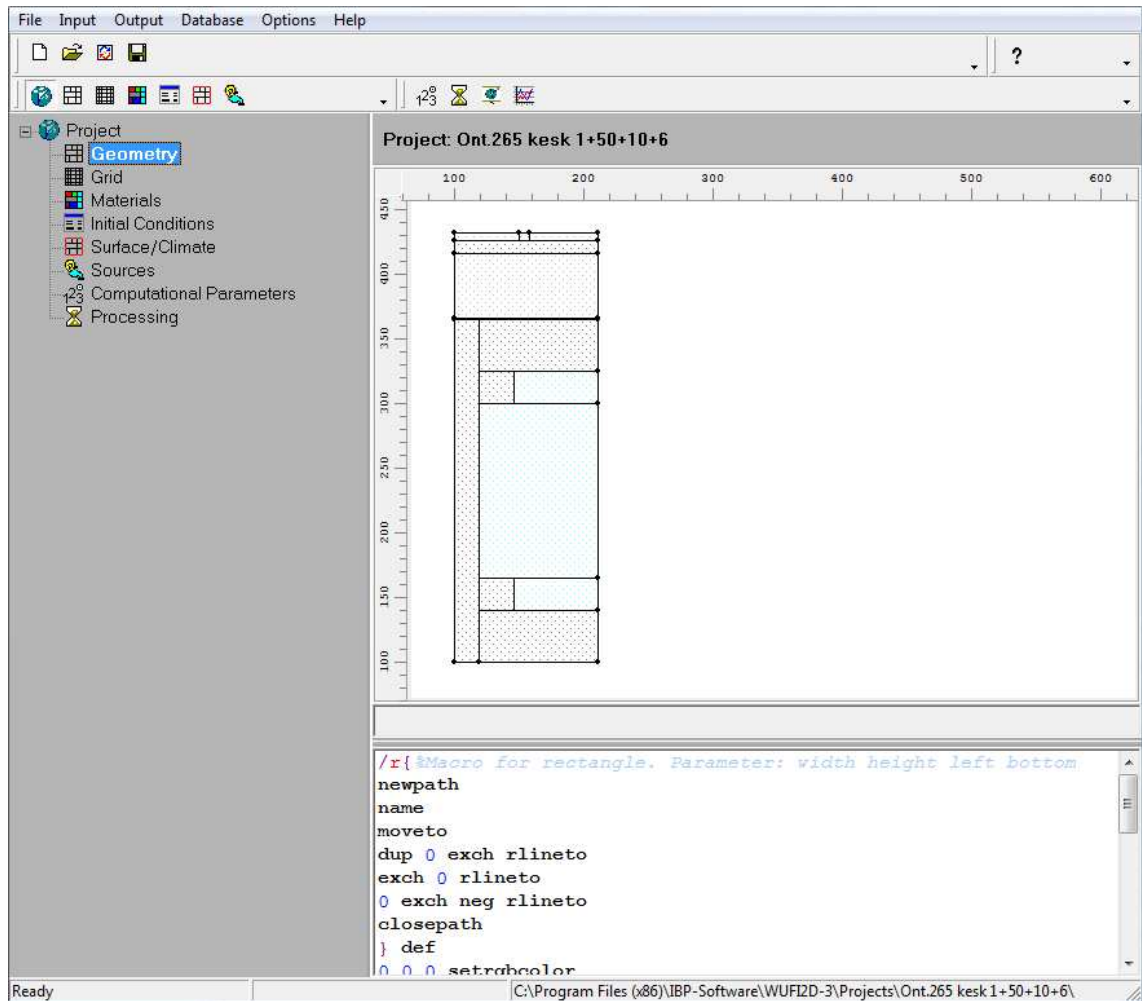
Rakenteen mallintaminen aloitetaan luomalla ohjelmaan rakennetta kuvaava geometria. WUFI 2D:ssä tämä tehdään suorakulmioita käyttäen. Tämä osio on hyvä tilaisuus käyttää yksinkertaistuksia laskennassa. Rakenteesta on suositeltavaa jättää kaikki ylimääräinen pois ja mallintaa rakenne pienimmän relevantin symmetria-akselin mukaan.

Tästä ovat esimerkkeinä kuvat 1 ja 2. Tässä on hyvä huomata, että käyttäessä symmetria-akseleita hyväkseen mallin pienentämisessä, tulosten tarkkuus ei laske lainkaan. Rakenteen ollessa symmetrinen, kosteus- ja lämpöliikkeet ovat peilikuva symmetria-akselin toisella puolella tapahtuvista kosteus- ja lämpöliikkeistä. Muita yksinkertaistuksia voi joutua tekemään laskennan helpottamiseksi, mutta näiden kanssa on oltava varuillaan: nämä mitä todennäköisimmin laskevat tulosten tarkkuutta. [16.]

Ohuita kappaleita mallinnettaessa on huomioitava, että materiaalin pienin sallittu paksuus on 1 mm. Tämä johtuu siitä, että ohuempia kappaleita ei voi jakaa tarpeeksi monen elementtiin, jotta laskenta sujuisi ongelmitta. Tällaisia kappaleita ovat esimerkiksi höyrynsulkumuovit. Jos kappaleen paksuutta joudutaan muuttamaan, on tämä otettava huomioon diffuusionvastuskertoimessa, jotta kappaleen eristysominaisuudet eivät huone. Ohuen kappaleen voi myös huomioida antamalla rakenteen pinnalle erillinen  $s_d$ -arvo. Näin voi simuloida esimerkiksi maalikerrosta. [16.]



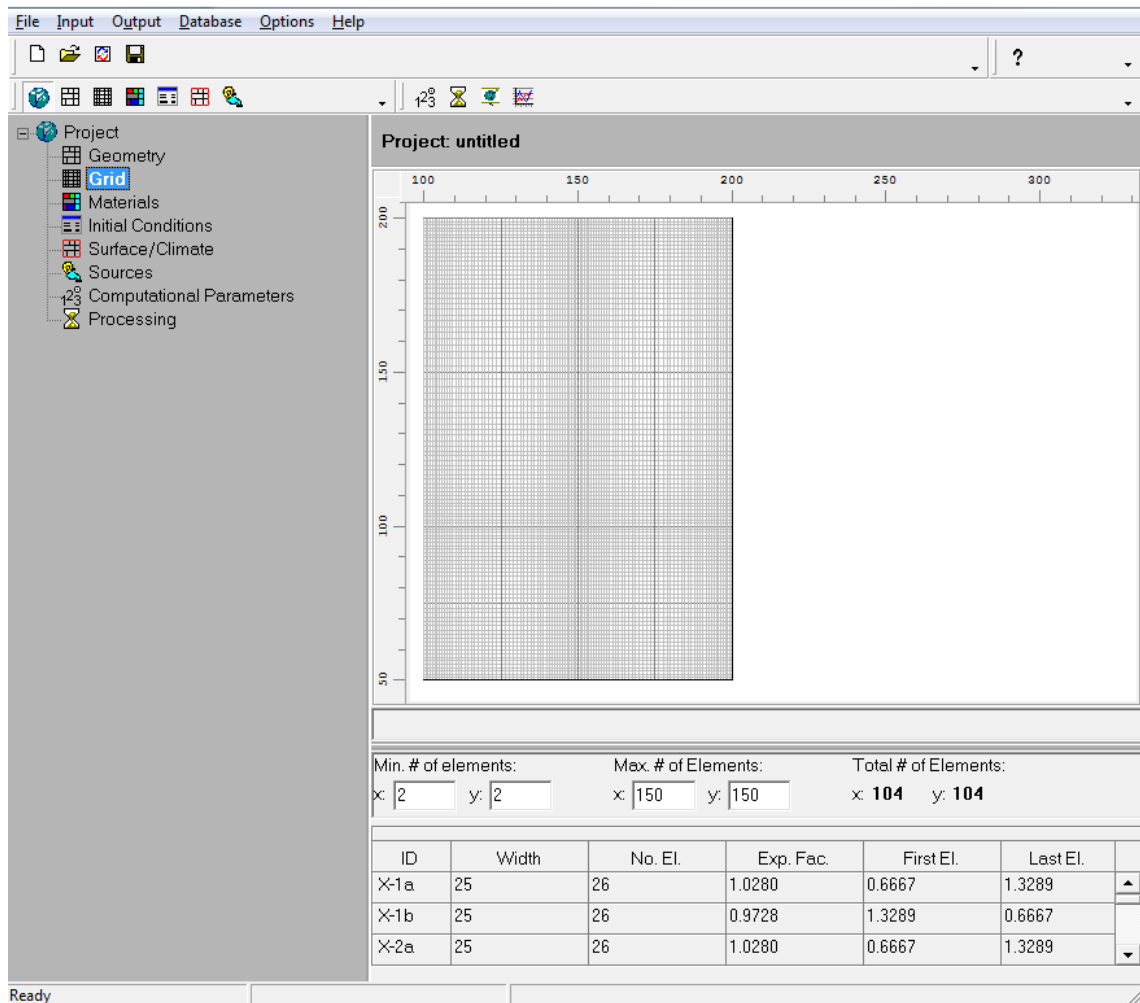
Kuva 1. Ontelolaatan mallinnettavat osat on merkitty punaisella alueella. Tarkasteltava alue on punaisessa laatikossa ja sen simuloimiseksi mallinnettava rakenne on tummennettu.



Kuva 2. WUFI 2D:n mallinnusnäkömää. Kuvassa on mallinnettu ontelolaatan kentässä oleva ontelo.

### Elementtiverkko

Ohjelman laskenta perustuu elementtilaskentaan, jolloin mallinnettava rakenne jaetaan moneen pieneen osaan. Tätä kutsutaan verkoksi tai hilaksi. Kuvassa 3 on kuvakaappaus tästä näkymästä. [16.]



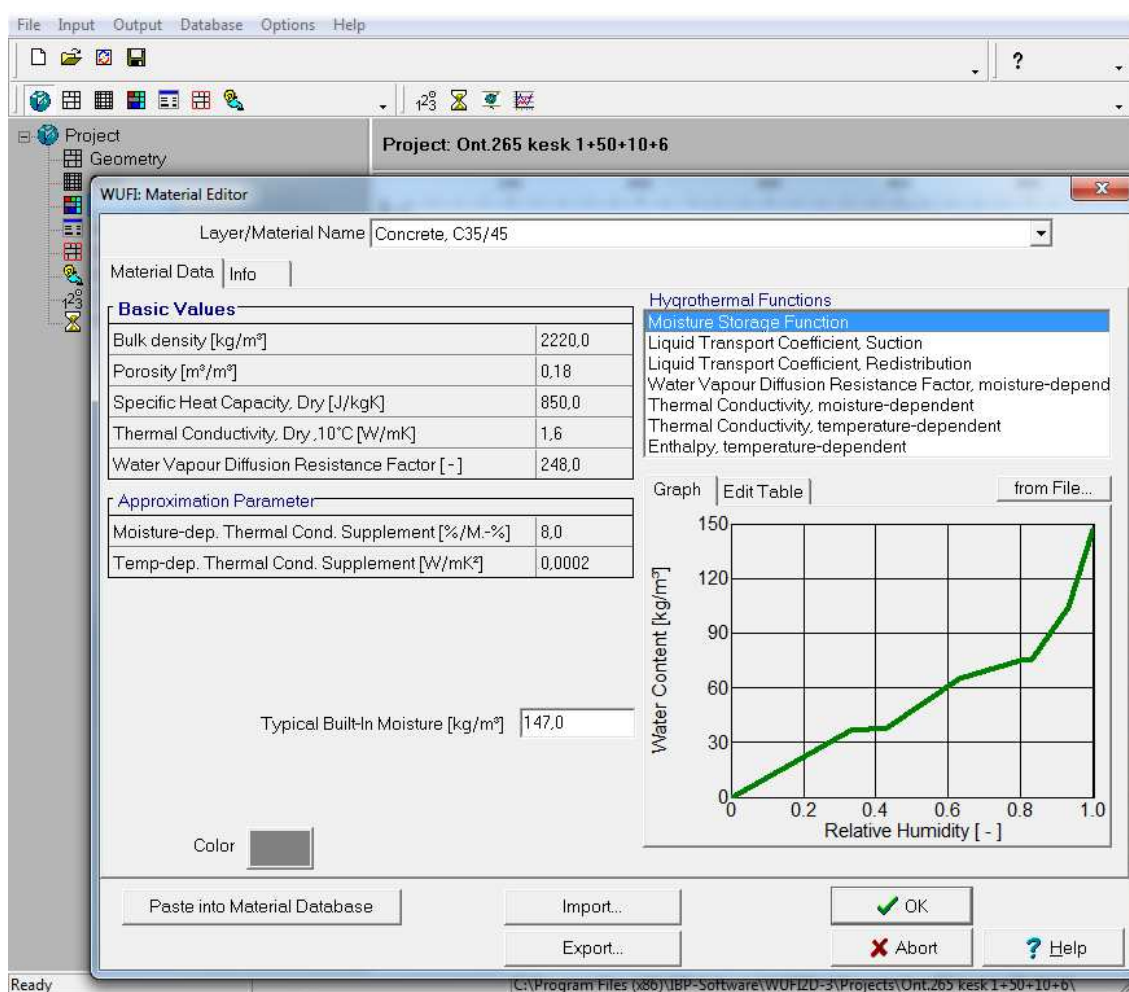
Kuva 3. Kuvakaappaus yksinkertaisen rakenteen oletusverkosta.

Tässä näkymässä voi muokata mallille luotua verkkoa. Nyrkkisääntönä voi pitää sitä, että mitä tiheämpi verkko – eli mitä enemmän elementtejä – sitä tarkempi tulos. Hilan turhaa tihentämistä tulisi välttää, sillä se kasvattaa laskenta-aikaa. Mikäli rakenne sisältää materiaaleja, joissa tapahtuu jyrkkiä muutoksia esimerkiksi kosteus- tai lämpögradientissa, on näiden kerrosten rajapintoihin sijoitettava paikallinen, tiheä verkko. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi höyrynsulkumuovit tai lämmöneristeet. Puolestaan paksujen, homogeenisien kerrosten, kohdalla hilaa voi harventaa. Tämä pätee esimerkiksi betonilaatan keskiosan kohdalla. [16.]

Joskus WUFI 2D ei pysty suorittamaan laskentaa loppuun. Tällöin on tietenkin hyvä tarkistaa mallin oikeellisuus materiaaliarvoineen ja reunaehtoineen, mutta jos nämä keinot eivät auta, verkon tihentäminen saattaa auttaa. [16.]

## Materiaaliarvot

Kun mallin geometria on valmis, tulee näille suorakulmioille määrätä materiaaliominaisuudet. Materiaaliarvot määrätään jokaiselle suorakulmiolle sekä x- että y-suunnassa. Tämä voi tulla aiheelliseksi esimerkiksi puuosia mallintaessa, sillä puun ominaisuudet ovat erilaiset syysuunnassa kuin kohtisuoraan syitä vastaan. [16.]



Kuva 4. Kuvakaappaus materiaalidataeditorista.

Jokaisella materiaalilla on pakko olla perustiedot, jotta laskenta voidaan suorittaa. Nämä tiedot ovat: tiheys ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ), huokoisuus ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), ominaislämpökapasiteetti ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ), lämmönjohtavuus ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) ja diffuusionvastuskerroin (-). Materiaalille on mahdollista määrittää myös muita ominaisuuksia, muun muassa sorptiokäyrä ja kosteusdiffusiteetit. Nämä ominaisuudet eivät ole välttämättömiä laskennan suorittamiseksi, mutta jos ne ovat tiedossa materiaalille, niitä tulisi käyttää. [16.]

WUFI 2D:ssä on valmiina mukana kattava materiaalikirjasto, johon on koottu materiaaleja ympäri maailmaa. Lisäksi käyttäjällä on mahdollisuus lisätä omia materiaaleja kirjastoon. [16.]

### *Alkuolosuhteet*

Tässä näkymässä rakennusmateriaaleille annetaan kosteus- ja lämpöolosuhteet, joiden pohjalta laskenta voi alkaa. Arvot voi määrätä materiaaleittain tai ne voi ladata tiedostosta. Alkuolosuhdetiedostojen käyttäminen on erittäin hyödyllistä, jos haluaa esimerkiksi mallintaa uusia materiaalikerroksia vanhojen päälle tai jos haluaa pilkkoa laskentaa osiin. Tällä tavalla laskentaa jaksottamalla ei tarvitse huolehtia esimerkiksi suuresta tulostiedostosta. [16.]

Rakennusfysikaalisesti toimivissa rakenteissa alkuolosuhteet eivät ole järin tärkeitä, sillä rakenteet kuivuvat, mikäli ne on suunniteltu oikein.

### *Reunaehdot*

Mallin rakenteille tulee määrätä reunaehdot. Näitä reunaehtoja ovat muun muassa pinta-astukset, sateen absorptiokerroin ja pinnan ominaisuudet säteilyn suhteen. Pinnan voi myös asettaa adiabaattiseksi eli niin sanotuksi systeemirajaksi. Tämän pinnan läpi ei virtaa lämpöä eikä kosteutta. Systeemirajat on asetettava symmetria-akseleille, kuten aiemmin mainittiin. [16.]

Pinnoille tulee myös määrätä ilmasto-olosuhteet. On mahdollista valita valmiita sää tiedostoja joista voi jalostaa sisäilmaa vastaavia olosuhteita erilaisten asetusten avulla. Tiettyjä olosuhteita voidaan myös simuloida määräämällä lämpötila tai kosteus vaihtelemaan sinikäyrän mukaisesti. Tarvittaessa on myös mahdollista asettaa vakio-olosuhteet. [16.]

### *Lähteet*

Tässä osiossa on mahdollista asettaa malliin lähteitä kosteudelle, lämmölle tai ilmalle. Näin voidaan simuloida esimerkiksi vuotavaa vesiputkea tai lämpöpatteria. Tässä tapauksessa elementtiverkosta valitaan alue, joka toimii lähteenä. Tämän jälkeen vali-



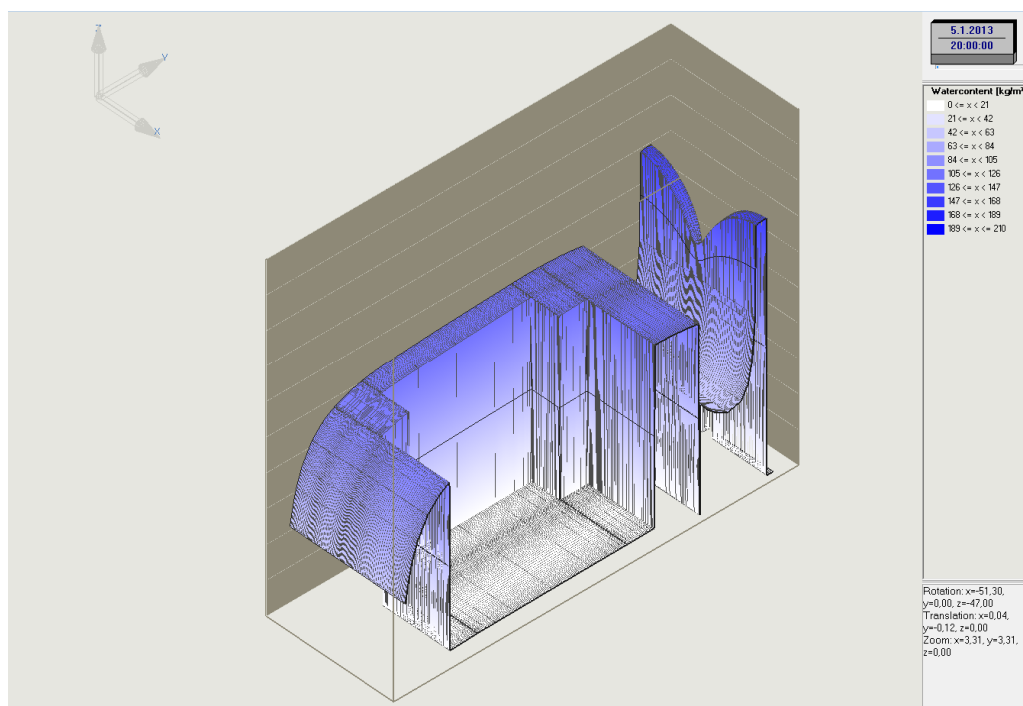
taan lähteen intensiteetti, toiminta-ajat ynnä muut asetukset. Näitä ominaisuuksia ei käytetty tässä työssä. [16.]

### *Laskentaparametrit*

Lopuksi simulointimallille asetetaan laskentaparametrit. Nämä ovat laskennan numeerisiin menetelmiin suoraan vaikuttavia asetuksia. Tärkeimmät näistä ovat aika-askelten määrä ja pituus, tarkkuuskriteerit sekä tulostiedoston sisältö. Lisäksi on mahdollista poistaa tiettyjä ilmiöitä, esimerkiksi kapillaarijohtuminen tai haihtumisesta johtuva viileneminen. Myös ratkaisualgoritmiin suoraan vaikuttavia muuttujia voi vaihtaa. Tämä saattaa auttaa, jos ohjelma ei pysty ratkaisemaan ongelmaa.

### *Tulosten tarkastelu*

Laskennan tuloksia voi tarkastella niin kutsutussa 3D-mallissa, jossa x- ja y-ulottuvuudet kuvastavat mallin geometriaa ja z-ulottuvuus tarkasteltavan suureen suuruutta. Tässä näkymässä jokaisen elementtiverkon osan sen hetkiset tiedot ovat selvästi näkyvissä. Tämä malli toimii animaation tavoin, joten sitä voi kelata edestakaisin tai hypätä tiettyyn ajankohtaan. Kuva 5 havainnollistaa tätä tulosmuotoa.

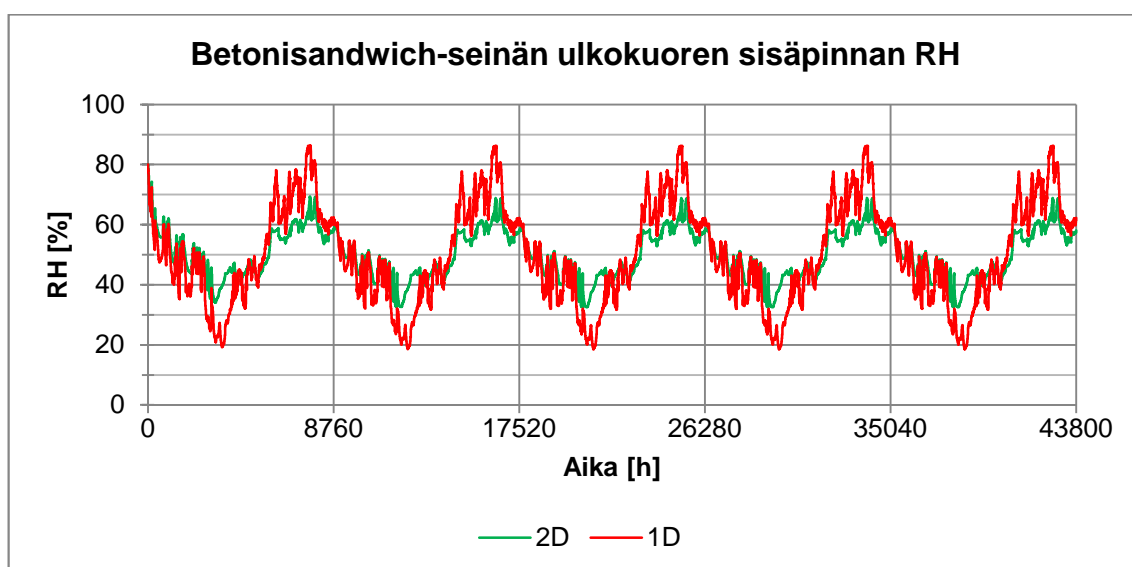


Kuva 5. Keraamisella laattalla päällystetyn ontelolaatan vesipitoisuus.

#### 4.3 Ohjelmien laskennan verifiointi

Ennen simulointiohjelmien varsinaista käyttöönottoa, niiden yhteneväisyys tarkistettiin. Tämä toteutettiin luomalla molemmilla ohjelmilla identtinen mallin, joka laskettiin. Lisäksi 2D-mallin keski- ja reunaelementtien tulosten välistä eroavaisuutta tarkasteltiin. Vertailurakenteena käytettiin pinnoittamatonta betonisandwich-seinää. Mallin rakenteet ja reunaehdot löytyvät luvussa 6.5.

Laskennan tuloksista huomattiin, että 1D-mallin tulosten keskihajonta oli huomattavasti 2D-mallin tuloksia suurempi. Mallien keskiarvot olivat lähes yhtenevät. Verifiointin tulokset on esitetty taulukossa 4 ja kuviossa 5.



Kuvio 5. WUFI PRO ja WUFI 2D -ohjelmien vertailu.

Taulukko 4. Simulointiohjelmistojen verifiointin tulokset taulukkomuodossa.

RH	Ulkokuoren sisäpinta		Mineraalivillan keskiosa	
	1D-malli	2D-malli	1D-malli	2D-malli
Maksimi	86.3831	80	90.20952	83.28784
Minimi	18.52074	32.53149	30.61207	50.02394
Keskiarvo	50.32486	49.87753	65.642	66.79959
Keskihajonta	16.32989	8.317522	14.17345	7.892572

Tuloksista voi tehdä johtopäätöksen, että 1D-mallista saadut tulokset ovat kriittisemmät kuin 2D-mallin tulokset. On huomattava, että tässä tilanteessa ei tiedetä, kumman ta-

pauksen tulokset ovat lähempänä todellisuutta. Arviointi tulisi tehdä kuitenkin suurimmilla mahdollisilla arvoilla. WUFI 2D:llä ei kuitenkaan jouduttu mallintamaan rakenteita, joissa homeriski olisi todennäköistä. Tällöin 2D-mallintamisen on perusteltua, kunhan huomioi, että tulokset saattavat olla todellisuudessa korkeammat.

## 5 SisäRYL 2013 pinnoitusvaatimukset

SisäRYL 2013 -ohjeeseen on kerätty hyvä rakennustavan mukaisia vaatimuksia eri sisä-rakennusvaiheiden työmenetelmille, materiaaleille ja työn laadulle. Yleinen periaate on, että jos SisäRYL tai jokin muu RYL-ohje ei mainitse jostain asiasta, niin käytetään tuotteen valmistajan ohjeistuksia. Taulukosta 5 löytyy betonirakenteiden pinnoitteille annetut yleiset alustavaatimukset.

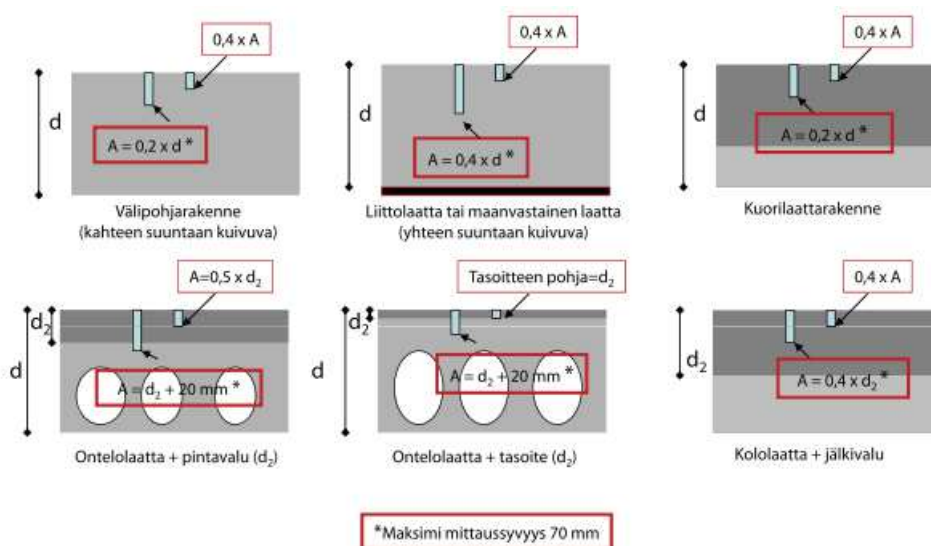
Taulukko 5. Alustan kosteusvaatimuksia pinnoitteen asentamiseen.

Pinnoitemateriaali	RH arviointisyvyydellä A	RH syvyydellä 0,4 x A	Lähde SisäRYL 2013
Mosaiikkiparketti	85	75	Taulukko 752:T4
Kerroksellisesti asennettava lautaparketti ja alusmateriaali	85	75	Taulukko 752:T4
Alustaan liimattava lautaparketti	85	75	Taulukko 752:T4
Laminaatti ja vesihöyryntiivis alusmateriaali	85	75	Taulukko 753:T4
Muovimatot	85	75	Taulukko 1041:T4
Linoleumimatto	85	75	Taulukko 1041:T4
Kumimatto	85	75	Taulukko 1041:T4
Korkkilaatta	85	75	Taulukko 1041:T4
Tekstiilimatto, jossa tiivis alusta	85	75	Taulukko 1041:T4
Luonnonmateriaaleista tehty tekstiilimatto	85	75	Taulukko 1041:T4
Flokattu matto tai laatta	85	75	Taulukko 1041:T4
Täyssynteettinen tekstiilimatto ilman alusrakennetta	90	75	Taulukko 1041:T4
Muovi-, kumi- tai linoleumilaatta	90	75	Taulukko 1041:T4

Taulukko 6. Alustan kosteusvaatimuksia pinnoitteen asentamiseen.

Pinnoitemateriaali	Betonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvo	Lähde SisäRYL 2013
Akryylipinnoite	97	Taulukko 1051:T1
Polyuretaanipinnoite	90	Taulukko 1051:T1
Liuotteeton epoksinpinnoite	97	Taulukko 1051:T1
Vesiohenteinen epoksinpinnoite	97	Taulukko 1051:T1
Epoksinpinnoite	97	Taulukko 1051:T1

Taulukon 6 vaatimuksista jäi aluksi epäselvyys, mistä kohdasta rakenteen suhteellinen kosteus tulisi mitata. Taulukon 5 vaatimukset ovat selviä, sillä SisäRYL 2013 -ohjeessa viitataan RT-korttiin RT 14-10984. Tässä kortissa ilmoitetaan kosteusmittauksen hyväksytyt menettelytavat ja mittaussyvyyydet. Taulukon 6 kohdalla kyseistä viittausta ei kuitenkaan ole, sen sijaan viitataan Suomen Betoniyhdistys r.y:n ja Suomen Betonilattiayhdistys r.y:n teoksiin by 45/BLY 7 Betonilattiat, ja by 54/BLY 12 Betonilattioiden pinnoitusohjeet. By 45 -oppaassa pinnoitusvaatimuksista ja alustan suhteellisen kosteuden mittaamisesta mainitaan, että kahteen suuntaan kuivuvan rakenteen tarkastelusyvyys on 20 % laatan paksuudesta ja yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen tarkastelusyvyys on 40 %. Tämä on eräitä poikkeustapauksia lukuun ottamatta sama ohje kuin RT-kortissa RT 15-10984. [18, s.144.]



Kuva 6. Arviointisyvyys A:n määritelmä rakennetyypeittäin RT-kortin 15-10984 mukaan.

Laatoituksen alustan kosteusvaatimuksista mainitaan SisäRYL 2013:ssa seuraavasti:

Alustat ovat kuivuneet riittävän ajan hyvissä olosuhteissa. Betonipinnoilta on sementtiliima poistettu [2, s. 541].

Yllä oleva ohjeistus ei käytännössä anna mitään tietoa. Kuitenkin by 47 Betonirakentamisen laatuohjeet -oppaassa keraamisten laattojen alustalle annetaan konkreettisia vaatimuksia, jotka on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Alustabetonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvot päällystyshetkellä.

Laatoituksen ja betonin välisen kiinnitysaineen muodonmuutoskyky	Betonin suhteellinen kosteus arviointisyvyydellä
1. Erittäin hyvä	95
2. Hyvä	90
3. Keskinkertainen	85
4. Pieni	80

Kuten yllä olevasta taulukosta ilmenee, laatoituksen laatat itsessään eivät aseta vaatimuksia betonialustan kosteudelle. Vaatimukset on sen sijaan laadittu betonin kuivuesssa tapahtuvaa kutistumaa silmällä pitäen. [19, s.70.]

Taulukon 6 luokitusta selitetään seuraavasti:

1. Vaatii aina erillisen selvityksen. Suunnittelussa voidaan hyödyntää tietoa esimerkiksi siitä, miten paljon rakenne päällystyksen jälkeen voi kuivua ja kutistua.
2. Laatoituksen ja betonin välinen muodonmuutoskyky on hyvä esim. jos käytetään pieniä saumattuja laattoja, jotka kiinnitetään joustavalla kiinnityslaastilla (S2-luokitus).
4. Laatoituksen ja betonin välinen muodonmuutoskyky on pieni, jos käytetään isoja laattoja puskusaumoin ja suurta pehmenyssaumaväliä (yli 5 m).

Luokka 3 on kyseessä kun muodonmuutoskyky on luokkien 2 ja 4 välissä. [19, s. 70-71.]

Tapetoitavan betoniseinän vaatimuksista mainitaan SisäRYL 2013 -ohjeessa seuraavasti:

Betonialustan suhteellinen kosteus on valmistajan ohjeen mukainen. Ellei muuta ole mainittu, se saa olla enintään 85 %. Mittausmenetelmä esitetään ohjekortissa RT 14-10984.

Maaleille ei löytynyt SisäRYL 2013 tai MaalausRYL 2012 -oppaista konkreettisia vaatimuksia pinnoitettavan alustan kosteudelle. Maalipinnalle etsittiin simulointikokein alustavaatimuksia. Näistä kokeista voi lukea enemmän luvussa 6.5.

Tasoite- ja oikaisumateriaalien betonialustoille ei löytynyt kosteusvaatimuksia RYL-ohjeista. Tuotteesta riippuen työselostuksen pintakosteusvaatimukset vaihtelivat välillä 90...95 RH %. Tässä työssä käytettiin tasoiteainetta, jonka alusbetonin suurin sallittu

pintakosteus oli 95 RH %. Simuloinnin kannalta ei ole juurikaan merkitystä, kumpaa raja-arvoa käyttää, sillä pinnoittamattoman betonin pintaosat kuivuvat hyvin nopeasti. Jos oletetaan ympäröivän ilman suhteelliseksi kosteudeksi 50 % ja lämpötilaksi 20 °C, niin 250 mm vahva C35/45-luokan teräsbetonivälipohja kuivuu 100 RH %:sta 95 RH %:iin 7 tunnissa. 90 RH %:n asti kuivuminen kestää 10 tuntia. Vaikkakin kuivumisominaisuudet vaihtelevat suuresti betonilaadusta riippuen, rakenteen pinta kuivuu kuitenkin hyvissä olosuhteissa muutamassa tunnissa.

## **6 Simulointimallit, materiaalit, reunaehdot ja tulokset**

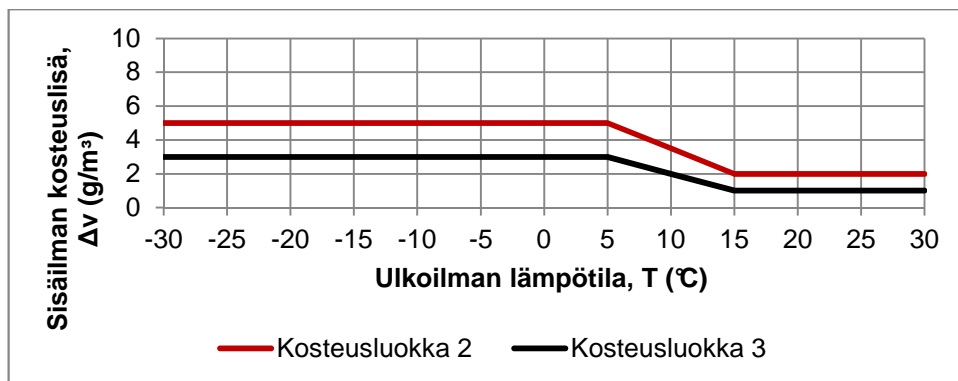
### **6.1 Yleistä**

Tässä luvussa esitellään tutkimuksessa käytetyt mallit, niiden rakenteet ja reunaehdot sekä simuloinnin tulokset. Tutkimuksessa tarkasteltiin kokonaisuudessaan neljää erilaista rakennetyyppiä: maanvarainen alapohjalaatta, teräsbetonilaatta ja ontelolaatta välipohjana sekä betonisandwich-seinä. Näissä rakenteissa käytettiin kolmea erilaista pintamateriaalia. Nämä olivat linoleumimatto, muovimatto ja keraaminen laatta.

Betonirakenteet oletettiin homogeenisiksi, sillä raudoituksen mallintaminen monimutkaistaisi malleja huomattavasti, eikä raudoitus todennäköisesti vaikuta mallin kosteustekniseen toimintaan merkittävästi. Kaikki käytetty betoni oli lujuusluokkaa C35/45.

Mallit pyrittiin rakentamaan niin, että niiden kosteusjakauma olisi mahdollisimman todennukainen. Tämä saavutettiin mallintamalla ensin täysin märkä betonilaatta tai -seinä, jonka annettiin kuivua, kunnes seuraavan rakennusvaiheen kosteusvaatimukset täyttyivät. Käytännössä tämä toteutettiin niin, että betonilaatan, jonka suhteellinen kosteus oli 100 %, annettiin kuivua, kunnes sen päällystettävän pinnan suhteellinen kosteus oli 95 %. Tämän jälkeen mallin kosteusjakauma tulostettiin ASCII-muodossa ja sitä muokattiin taulukkolaskentaohjelmalla niin, että rakennemalliin lisättävän pintavalun tai tasoitteen suhteellinen kosteus on 100 %. Seuraavaksi mallin annetaan jälleen kuivua, kunnes arviointisyvyyden A ja  $0,4 \cdot A$  kosteusvaatimukset täyttyvät. Tämän jälkeen rakenteen kyseisen hetken kosteusprofiili tulostetaan taas ASCII-muodossa ja se muokataan, jotta rakennemalliin lisättävän pintamateriaalin alkukosteus on sopiva. Vasta tässä vaiheessa malli on valmis ja se voidaan laskea.

Työssä oletetaan suotuisat olosuhteet betonin kuivumiselle rakennusaikana. Tämä tarkoittaa jatkuvaa 20 °C lämpötilaa ja 50 % suhteellista kosteutta. Rakenteen pinnoittamisen jälkeen mahdolliselle ulkoilmastolle asetettiin testivuosi Vantaa-07, joka luotiin FRAME-projektin yhteydessä. Sisäilmastoille käytettiin samaa testivuotta, mutta tämä muokattiin sisäilmastoa kuvaavaksi asettamalla sisäilman lämpötilaksi pysyvästi 20 °C ja asettamalla RIL 107-2012 -ohjeen mukainen kosteuslisä. Työn malleissa käytettiin kosteusluokkaa 2, joka on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6. Sisäilman kosteuslisä. Kosteusluokka 1 on suurempi kuin luokka 2 ja vaatii aina erikoisselvityksen. [20, s.24]

Laskennan jälkeen tarkastelupisteiden kosteus- ja lämpötiedot syötetään VTT-TTY homemalliin, josta saadaan kyseisen pisteen homeindeksi. Nämä tiedot otetaan viimeisestä eli pinnoittamisen jälkeen suoritetusta laskennasta.

Teräsbetonivälipohja, betonisandwich-seinä ja teräsbetonialapohja mallinnettiin WUFI PRO 5 -ohjelmalla ja ontelolaattavälipohja mallinnettiin WUFI 2D -ohjelmaa käyttäen. Lisäksi kaikki keraamisilla laatoilla päällystetyt rakenteet mallinnettiin sekä WUFI 2D että WUFI PRO -ohjelmilla. Simuloinnissa käytetyt materiaaliarvot on esitetty liitteessä 1. Homeindeksi-, kosteus- ja lämpökuvaajat on esitetty rakenteittain liitteissä 2-5.

### *Linoleumimatto*

Linoleumi on juuttikudosalustalle kalanturoidusta homogeenisestä massasta valmistettu lattiapäällyste. Linoleumi sisältää paljon orgaanista ainetta: sideaineena pellavaöljyä sekä hartsia, ja täyteaineena puu- tai korkkirouhetta tai -jauhetta. Linoleumin kaltaista ainetta ei homemallia laadittaessa tutkittu, joten homehtumisherkkyysluokista ei ollut varmuutta. Työssä päädyttiin käyttämään linoleumille homehtumisherkkyysluokkaa 2.

Linoleumimaton alapinnassa on juuttikangas, jonka homehtumisherkkyysluokasta ei ole tietoa. Tästä syystä juuttikankaan homehtumisherkkyysluokan arvioitiin olevan 1. Linoleumimaton yhteydessä käytetään liimaa, jonka homehtumisherkkyysluokan arvioitiin olevan 3. [21, 22.]

#### *Muovimatto*

Muovimaton oletetaan kuuluvan homehtumisherkkyysluokkaan 3. Muovimattoja ei tutkittu homemallia laadittaessa, mutta muovipohjaisia aineita kylläkin. Homeindeksilaskentapohjan ohjeistuksen mukaan tämän voi yleistää pätevän yleisesti muovipohjaisiin rakennusaineisiin. Linoleumimaton tapaan muovimaton yhteydessä käytetään liimaa. [14.]

#### *Keraaminen laatta*

Keraamista laatoitusta ei voida mallintaa mielekkäästi ilman kolmiulotteiseen laskentaan kykeneviä ohjelmia. Tästä syystä keraaminen laatoitus on mallinnettu antamalla pinnoitettavalle pinnalle erillinen  $S_d$ -arvo 2 m, joka kuvastaa laatoituksen vesihöyrynvastusta. Tämä ei kuitenkaan ota kuivattavia saumoja huomioon, joten mallin tulokset ovat kosteusriskin kannalta varmallalla puolella. Keraamiset laatat mallinnettiin tämän lisäksi myös WUFI 2D:lla, sillä tässä tapauksessa voidaan ottaa puolet saumoista huomioon. Lisäksi ohjelmien verifiointissa WUFI 2D:n antavan vähemmän kriittisiä tuloksia kuin WUFI PRO, joten todellisten tulosten voidaan olettaa olevan näiden kahden ohjelman mallien välimaastossa. WUFI 2D-ohjelmassa keraaminen laatoitus mallinnettiin 6 mm paksuna, 100 mm leveänä ja 8 mm saumapaksuudella.

Keraamisen laatan homehtumisherkkyysluokan arvioitiin kuuluvan luokkaan 3. Laatoituksen yhteydessä käytettiin kiinnityslaastia, joka sementtipohjaisena kuuluu homehtumisherkkyysluokkaan 3. Kiinnityslaastin ja betonin välisen muodonmuutoskyvyn oletettiin olevan erittäin hyvä, jolloin arviointisyvyyden A RH saa olla 95 % pinnoitushetkellä. Tämä on korkein sallittu suhteellisen kosteuden arvo laatoittaessa. [19, s. 70.]

#### *Maalipinta*

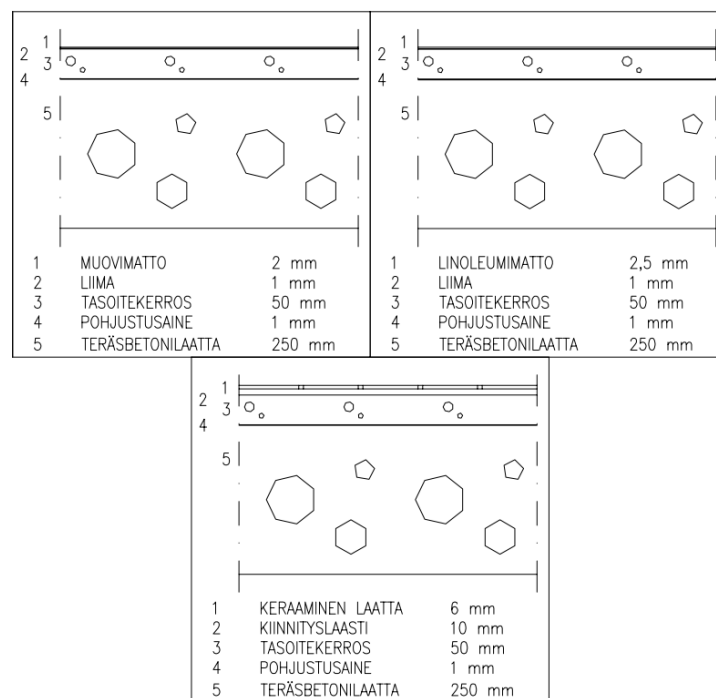
Työhön valittiin maali, jonka  $S_d$ -arvo on 0,5 m. Maalikerros alustetaan ohuella tasoitekerroksella. Maaleille ei löytynyt yleisiä alustan kosteusvaatimuksia, joten työssä ko-



keiltiin muutamia erilaisia suhteellisen kosteuden lähtöarvoja. Kokeissa simuloitiin tilanteet, joissa koko rakennelman lähtökosteus oli 100 RH% ja 80 RH%. Molemmat tilanteet toistettiin sekä heti alusta asti maalattuna että maalaamattomana. Näin saatiin selville, vaikuttaako alkukosteus homeriskiinkin rakenteessa.

## 6.2 Teräsbetonivälipohja

Välipohjalaatta on mallissa kahteen suuntaan kuivuva betonilaatta. Se on 250 mm vahva ja sen päälle valetaan 50 mm pintavalu, kun betonilaatan pinnan suhteellinen kosteus on 95 %. Valu alustetaan kiinnitystä parantavalla pohjustusaineella. Tämän jälkeen lisätään pinnoitusmateriaali, kun betonilaatan suhteellinen kosteus arviointisyvyyksillä on riittävän matala.



Kuva 7. Teräsbetonivälipohjalaattojen rakennemallit. Systemiraja on merkitty katkoviivalla.

### Reunaehdot

Taulukossa 8 on ilmoitettu teräsbetonivälipohjan tapauksessa käytetyt reunaehdot. Samoja reunaehtoja käytettiin myös ontelolaattavälipohjan mallintamisessa.

Taulukko 8. Teräsbetonivälipohjan reunaehdot taulukoituna.

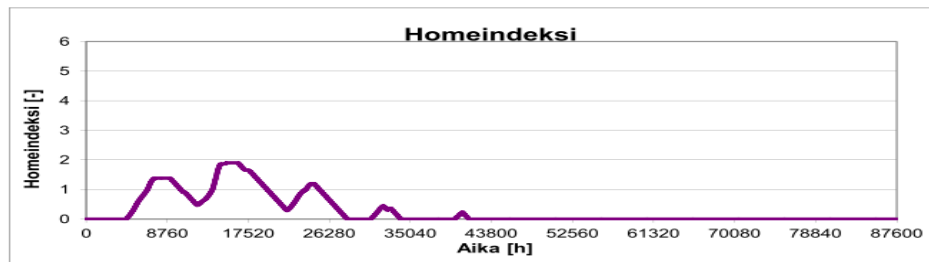
	Yläpinta	Alapinta
$S_d$ -arvo [m]	-	-
Lämmönvastus [ $m^2K/W$ ]	0.17	0.1
Lyhytaaltoisen säteilyn absorptio [-]	-	-
Pitkääaltoisen säteilyn emissiviteetti [-]	-	-
Sateen imeytymiskerroin [-]	-	-
Ilmansuunta [°] (etelä = 0°, länsi = 90°)	-	-
Sadekerroin 1 [-]	-	-
Sadekerroin 2 [s/m]	-	-
Ilmasto	2)	2)
1) Vantaa-07 2) Vantaa-07, kosteusluokka 2 (kuvio 5), lämpötila jatkuvasti 20 °C 3) Sinikäyrällä mallinnettu lämpötila: keskiarvo 15,5 °C, amplitudi 0,5 °C; RH 100 % jatkuvasti		

### Tarkastelupisteet

Tarkastelupisteitä ovat linoleumin ylä- ja alapinta, juuttikankaan ylä- ja alapinta, liima-kerroksen ylä- ja alapinta sekä tasoitekerroksen ylä- ja alapinta.

### Tulokset

Linoleumimattotapauksessa homeindeksin suurin arvo oli 1,904 ja se saatiin juuttikankaan ja kiinnitysliiman kosketuspinnasta. Tämä johtuu liiman luovuttamasta kosteudesta. Lisäksi tiivis linoleumipinnoite hidastaa kuivumista ja laskennassa on käytettävä herkän linoleumin homehtumisherkkyysluokkaa. Tämä tulos tarkoittaa, että hometta muodostuu, mutta se ei ole paljain silmin havaittavaa. Kuviossa 7 on esitetty juuttikankaan ja liimakerroksen rajapinnan homeindeksikuvaaja. Muissa tarkastelupisteissä homeindeksi jäi alle arvon 1. Pinnoitettavan alustan kosteusvaatimus linoleumimaton tapauksessa on aiheellista tarkistaa.



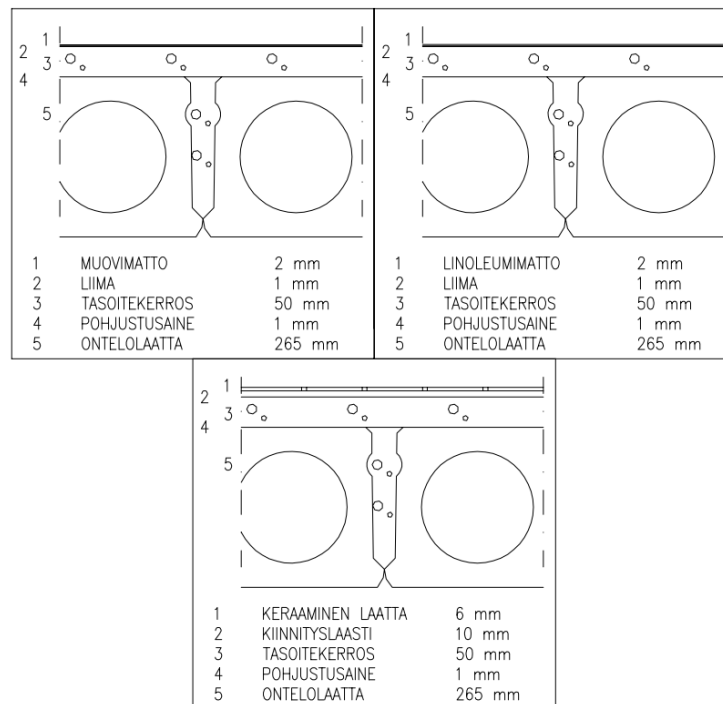
Kuvio 7. Juuttikankaan alapinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 1. Suurin homeindeksi 2,306 hetkellä 14320...17905 h.

Muovimattotapauksen suurin homeindeksi saavutettiin liimakerroksen ja tasoitekerroksen rajapinnassa. Homeindeksi oli kuitenkin vain 0,461, joten hometta tuskin muodostuu.

Keraamisen laatan tapauksessa suurin homeindeksin arvo oli 0,744 ja se ilmeni kiinnityslaastikerroksen ja keraamisen laatan alapohja välissä. Tässä tapauksessa on hyvä muistaa, että yksiulotteisella mallilla ei voida huomioida laatoituksen saumoja, joten homeindeksit ovat epätavallisen korkeita. 2D-mallilla suurin homeindeksi oli 0,526 tasoitekerroksen alapinnassa. Missään mallinnetuista rakenteissa ei ollut homemallin mukaan homeriskiä. Lisävarmuutta tulee siitä, että homeindeksit nousun jälkeen laskevat nolleen, eivätkä sen jälkeen enää nouse.

### 6.3 Ontelolaattavälipohja

Ontelolaatta on kahteen suuntaan kuivuva, 265 mm vahva ja sen päälle valetaan 50 mm paksu jälkivalu. Ontelolaattarakenne on identtinen massiivibetonilaattaan, paitsi että ontelolaatassa on 185 mm halkaisijaltaan olevia onteloita, jotka ovat täynnä ilmaa. Rakennemallit on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Ontelolaattarakennemallit. Systeimirajat on merkitty katkoviivoin.

### *Reunaehdot*

Ontelolaattamallien reunaehdot ovat samat kuin teräsbetonivälipohjatapauksessa. Nämä ovat yllä taulukossa 8.

### *Tarkastelupisteet*

Tarkastelupisteet ovat samat kuin teräsbetonivälipohjassa. Tarkastelupisteet ovat kahden ontelolaatan saumakohdassa. Tämä kohta katsottiin kriittisimmäksi, sillä siinä on enemmän betonia kuin kentässä olevien onteloiden välissä, mikä tarkoittaa suurempaa kosteusmäärää.

### *Tulokset*

Linoleumilla päällystetyssä ontelolaatassa oli erittäin pienet homeindeksit: suurin oli vain 0,024. Tämä saavutettiin linoleumimaton pinnalta. Tämä homeindeksin arvo johtui puhtaasti sisäilman suhteellisesta kosteudesta, sillä tämä homeindeksin ”huippu” toistuu tasaisin väliajoin sisäilman korkeimman arvon yhteydessä.

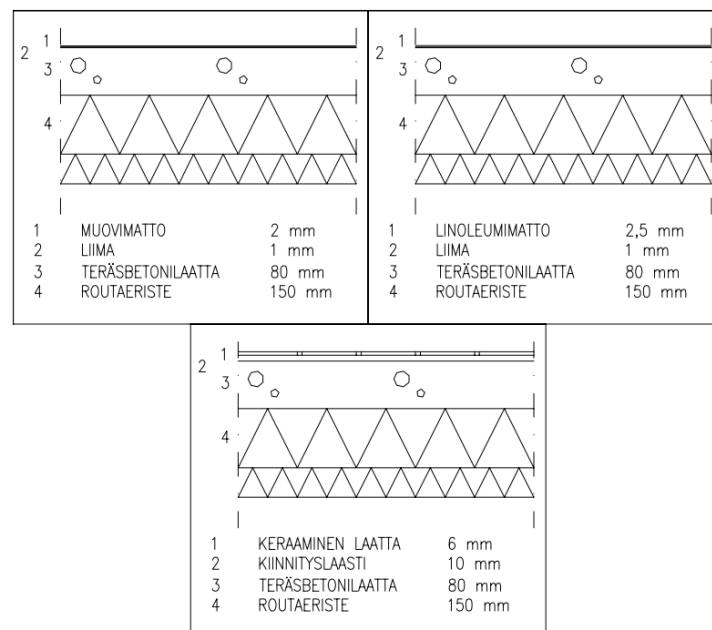
Muovimaton kuuluminen korkeampaan homehtumisherkkyysluokkaan näkyy, sillä suurin saavutettu homeindeksi oli 0.

Keraamisen laatan tapauksessa suurimmat arvot olivat tasoitekerroksen ja ontelolaatan välissä. Tämä arvo oli 0,274. Yläosien korkein arvo oli 0,261 mikä saavutettiin jälleen keraamisen laatan alapinnasta.

Samaten kuin teräsbetonivälipohjan tapauksessa, tässäkin homeriski on mitättömän pieni. Ontelolaatta ei sisällä niin paljon vettä kuin umpibetonia oleva laatta, joten se kuivuukin nopeammin.

#### 6.4 Maanvarainen teräsbetonilaatta

Maanvarainen teräsbetonilaatta mallinnettiin yhteen suuntaan kuivuvana. Tällöin siihen pätevät tiukemmat kosteusvaatimukset päällystettäessä. Lisäksi routaeristeiden alapintaan asetettiin reunaehdot, joissa RH on jatkuvasti 100 % ja lämpötila vaihtelee välillä 15...16 °C. [23, s. 12.]



Kuva 9. Maanvastaiset alapohjarakennemallit. Systemirajat merkitty katkoviivalla.

## Reunaehdot

Taulukko 9. Maanvaraisen teräsbetoni-laatan reunaehdot.

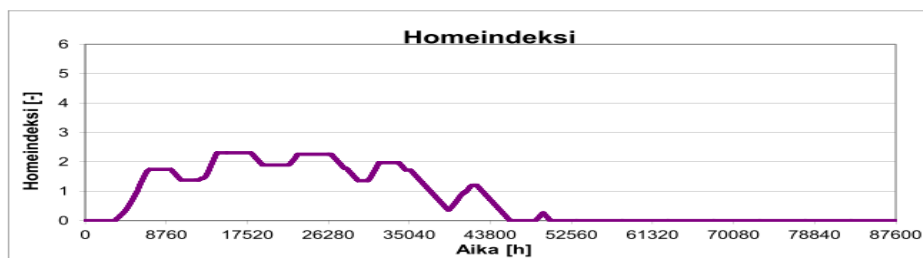
	Yläpinta	Alapinta
$S_d$ -arvo [m]	-	-
Lämmönvastus [ $m^2K/W$ ]	0.17	0.1
Lyhytaaltoisen säteilyn absorptio [-]	-	-
Pitkääaltoisen säteilyn emissiviteetti [-]	-	-
Sateen imeytymiskerroin [-]	-	-
Ilmansuunta [°] (etelä = 0°, länsi = 90°)	-	-
Sadekerroin 1 [-]	-	-
Sadekerroin 2 [s/m]	-	-
Ilmasto	2)	3)
1) Vantaa-07 2) Vantaa-07, kosteusluokka 2 (kuvio 5), lämpötila jatkuvasti 20 °C 3) Sinikäyrällä mallinnettu lämpötila: keskiarvo 15,5 °C, amplitudi 0,5 °C; RH 100 % jatkuvasti		

## Tarkastelupisteet

Mallin tarkastelupisteet olivat päällystemateriaalin, kiinnitysmateriaalin ja betonilaatan ylä- ja alapinnat.

## Tulokset

Linoleumilla päällystetyn laatan herkin kohta löytyy jälleen juuttikankaan ja liimakerroksen kosketuspinnasta. Siellä päästään arvoon 2,306. Tämä tarkoittaa, että hometta todennäköisesti muodostuu tarkastelupisteeseen, mutta sitä ei voi nähdä paljain silmin. Kuviossa 8 on esitetty juuttikankaan ja liimakerroksen homeindeksikuvaaja. Muissa tarkastelupisteissä homeindeksi jäi alle arvon 1.



Kuvio 8. Juuttikankaan alapinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 1. Suurin homeindeksi 2,306 hetkellä 14320...17905 h.

Muovimaton kohdalla tapaus on mielenkiintoinen. Homeindeksi on korkeimmillaan 0,733 liimakerroksen ja betonialapohjan välissä, ja homeindeksi on tässä arvossa yli 7 vuotta. Lasku alkaa noin 12 vuoden kuluttua päällystyksestä ja homeindeksi on nollassa noin 13 vuoden kuluttua päällystyksestä. Tämä tapaus demonstroi hyvin, miksi alapohjat ovat kosteusteknisesti haasteellisia kohteita. Jatkuvat kosteusrasitus laatan alapuolelta sekä tiivis pintamateriaali eivät ole ideaali yhdistelmä. Tässä tapauksessa homeetta ei kuitenkaan laskennallisesti muodostunut.

Keraamisen laatan ja laastikerroksen liittymästä saatiin 1D-tarkastelussa arvo 1,369. Homeindeksi nousee hieman alle vuodessa maksimiarvoonsa ja pysyy siinä hieman yli 2 vuotta. Tämän jälkeen homeindeksi kuitenkin laskee noin kahden vuoden kuluessa nollaan. Tämä johtunee siitä, että kiinnityslaastista vapautuu rakenteeseen huomattava määrä kosteutta.

2D-mallissa tulokset ovat samansuuntaisia, mutta odotetusti matalampia. Keraamisen laatan alapinnan suurin homeindeksi oli 0,614.

Vaikkakin tästä rakenteesta löytyi tapaus, joissa homeindeksi ylsi yli arvon 2, on kuitenkin muistettava, että homeindeksin arvo 2 tarkoittaa kasvua, jota ei voi havaita paljain silmin. Kuitenkin kaikissa tapauksissa homeindeksi laski loppujen lopuksi nollaan, joten vaikka kasvustoa ilmenisikin hieman, se mitä todennäköisimmin myös kuolisi pois.

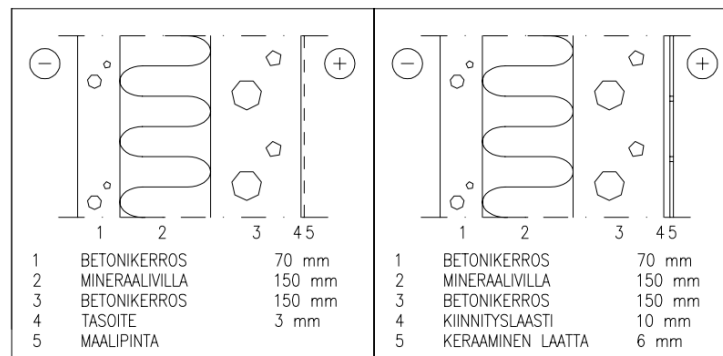
## 6.5 Betonisandwich-seinä

Tämä malli oli työn haastavin. Rakenne on itsessään monimutkaisempi kuin aiemmat ja ulkopinta altistuu sadekuormalle. Rakenne jouduttiin mallintamaan ilman tuuletusra-

koa tai tuuletusuria, sillä WUFI-ohjelmilla ei voi simuloida ilmavirtauksia, eikä siten niiden kuivattavaa vaikutusta. Olisi ollut mahdollista asettaa malliin ilmalähde, mutta ilman kosteuskapasiteettia ei voi asettaa riippuvaiseksi lämpötilasta, joten ilmanvaihdon kuivattava vaikutus olisi erittäin epätarkka. Tästä syystä rakenne mallinnettiin tuuletamattomana. [16]

Mallilla tarkasteltiin laattapinnoitusta ja maalausta sisäpinnassa. Maalikerrosta ei mallinnettu rakenteessa fyysiseksi objektiksi, vaan sisäpinnalle annettiin erillinen  $S_d$ -arvo 0,5 m.

Maalipinnalle päätettiin etsiä sopivat alustavaatimukset, kuten muille tutkituille materiaaleille on esitetty. Tämä tehtiin useilla simulaatioilla, aina hieman vaihtaen alkuolosuhteita ja kosteutta pinnoitushetkellä. Vertailusimulointeja suoritettiin myös kokonaan pinnoittamattomilla malleilla. Näitä tuloksia verrattiin homeindeksin avulla toisiinsa.



Kuva 10. Betonisandwich-seinän rakennemallit.

### *Reunaehdot*

Taulukossa 10 on esitetty mallissa käytetyt reunaehdot.



Taulukko 10. Betonisandwich-seinärakenteen reunaehdot.

	Keraaminen laatta		Maalipinta	
	Ulkopinta	Sisäpinta	Ulkopinta	Sisäpinta
Sd-arvo [m]	-	-	-	0,5
Lämmönvastus [m <sup>2</sup> K/W]	0.04	0.13	0.04	0.13
Lyhytaaltoisen säteilyn absorptio [-]	-	-	-	-
Pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteetti [-]	-	-	-	-
Sateen imeytymiskerroin [-]	0,7	-	0,7	-
Ilmansuunta [°] (etelä = 0°, länsi = 90°)	0	-	0	-
Sadekerroin 1 [-]	-	-	-	-
Sadekerroin 2 [s/m]	-	-	-	-
Ilmasto	1)	2)	1)	2)
1) Vantaa-07				
2) Vantaa-07, sisäilmasto, kosteusluokka 2 (kuvio 5), lämpötila jatkuvasti 20 °C				
3) Sinikäyrällä mallinnettu lämpötila: keskiarvo 15.5 °C, amplitudi 0.5 °C, RH 100 % jatkuvasti				

### Tarkastelupisteet

Molemmissa malleissa tarkasteltiin jokaisen ainekerroksen ulko- ja sisäpintaa. Lisäksi tarkasteltiin mineraalivillakerroksen keskikohtaa. Maalipinnan tapauksessa itse maalia ei fyysisesti mallinnettu, joten sen pintoja ei tarkasteltu.

### Tulokset

Maalipinnoitetun betonisandwich-seinän tulokset olivat yllättäviä. Taulukoista 11 ja 12 nähdään tehdyt tarkastelut. Taulukossa 11 tarkasteltiin pinnoittamattoman betonisandwich-seinän kosteusteknistä toimintaa. Koko rakenteen alkukosteuksina käytettiin arvoja 100 % ja 80 %. Taulukoista nähdään eri alkukosteuksilla 10 vuoden tarkastelujaksolla mitatut homeindeksit materiaalikerroksittain.

Taulukko 11. Maalipinnan kosteusvaatimusten haarukointikoe: maalaamaton sisäpinta.

	Ei pinnoitteita	Alkutilanteen RH		Homehtumisherkkyyssuokat	
		100 %	80 %		
Materiaali	Pinta	Homeindeksin maksimi		Kasvunopeus	Maksimimäärä
Sisäkuoren-betoni	Sisäpinta	0.002	0	4	4
	Ulkopinta	0.105	0.003	3	4
Mineraali-villa	Sisäpinta	0.099	0.014	3	3
	Keskiosa	0.373	0.044	3	3
	Ulkopinta	3.115	3.115	3	3
Ulkokuoren-betoni	Sisäpinta	1.76	1.76	3	4
	Ulkopinta	0.036	0.036	4	4

Taulukosta 11 selviää, että vaikka rakenne olisi huomattavan kuiva, mineraalivillan ulkopintaan ja ulkokuoren betonin sisäpintaan muodostuu homekasvustoa. Tämä kasvusto ei simuloituissa olosuhteissa poistu, vaan pysyy lähes vakiona noustuaan huippuunsa. Lisäksi on huomattava, että alkukosteudesta riippumatta yllämainitut tarkastelupisteet saavuttavat kutakuinkin saman homeindeksin. Tästä on kuitenkin poikkeuksena sisäpuolen betoni ja mineraalivillan sisäpinta sekä keskiosa. Näiden kerrosten homeindekseissä on eroja, mutta arvot ovat pieniä.

Taulukossa 12 on saman tapaan simuloitu betonisandwich-seinää, mutta tässä tapauksessa maalipinta asennettiin alkutilanteen suhteellisen kosteuden vallitessa koko rakenteessa.

Taulukko 12. Maalipinnan kosteusvaatimusten haarukointikoe: maalattu sisäpinta.

	Sisäpinta maalattu	Alkutilanteen RH		Homehtumisherkkyyssuokat	
		100 %	80 %		
Materiaali	Pinta	Homeindeksin maksimi		Kasvunopeus	Maksimimäärä
Tasoite	Sisäpinta	0.283	0	3	3
	Ulkopinta	0.405	0	3	3
Sisäkuoren-betoni	Sisäpinta	0.389	0	3	4
	Ulkopinta	0.178	0.006	3	4
Mineraali-villa	Sisäpinta	0.175	0.012	3	3
	Keskiosa	0.873	0.045	3	3
	Ulkopinta	3.113	3.112	3	3
Ulkokuoren-betoni	Sisäpinta	1.76	1.76	3	4
	Ulkopinta	0.036	0.036	4	4

Taulukosta 12 huomataan, että edes täysin märälle pinnalle asennettu maalikerros ei saa aikaan homekasvustoa. Mineraalivillakerroksen keskiosan homeindeksi on lähes 1, mutta sekin on alle kasvurajan. Lisäksi sisältä päin aiemmat kerrokset ovat indeksiltään matalia. Tästä huolimatta 100 RH% betoniseinää ei sovi maalata, sillä maaleilla on muitakin kosteudesta johtuvia vauriomekanismeja kuin homehtuminen.

On kuitenkin mielenkiintoista huomata, että mineraalivillakerroksen ulkopinnan ja ulko-betonin homeindeksit ovat lähes identtiset kaikissa neljässä kokeessa. Tästä voi päätellä, että näiden kerrosten homeindeksiin ei voi vaikuttaa maalausluston kosteusvaatimuksilla.

1D-mallissa laatoitetun rakenteen homeindeksit olivat samaa luokkaa kuin maalatun pinnan kohdalla. Laatoituksen alapuolella suurin arvo oli 0,298. Mineraalivillan keskiosan indeksi oli 0,211. Rakenteen suurin homeindeksi 2,656 löytyi jälleen mineraalivillan ulkopinnasta. Ulkokuoren sisäpinnan homeindeksi oli 1,519. Nämä eivät myöskään laskeneet nollaan. Ulkokuoren ulkopinnan homeindeksi oli 0,028. Homeindeksin arvot ovat samaa suuruusluokkaa näillä alueilla, vaikkakin pientä eroavaisuutta on.

2D-mallissa tulokset olivat jälleen samankaltaisia kuin 1D-mallissa, mutta hillitympiä. Mineraalivillakerroksen ulkopinnassa saatiin mallin korkein arvo 2,656 eikä homeindeksi näissä olosuhteissa koskaan laske nollaan.

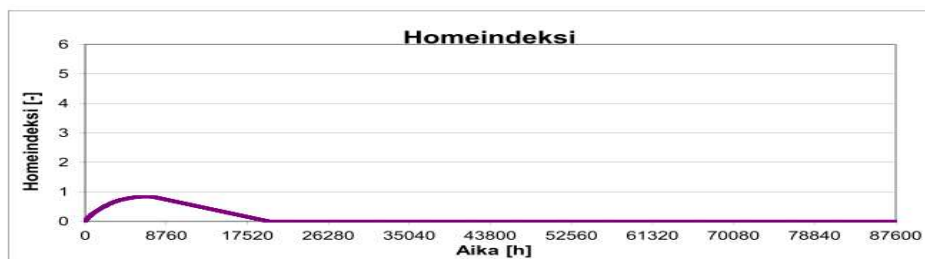
## 6.6 Materiaalien herkkyystarkastelu

Suurta osaa työssä tutkituista materiaaleista ei ole tutkittu VTT-TTY homemallia kehitettäessä. Tästä syystä osalle materiaaleista jouduttiin arvioimaan homehtumisherkkyysluokka. Esimerkiksi muovimatto ja liima oletettiin muovipohjaisiksi materiaaleiksi, jotka kuuluisivat homehtumisherkkyysluokkaan 3. Samaten kiinnityslaasti kuuluisi sementtipohjaisena luokkaan 3. Jos yllä mainituille materiaaleille olisi käytetty homehtumisherkkyysluokkaa 2, homeindeksit olisivat luonnollisesti olleet korkeampia.

Käytettäessä homehtumisherkkyysluokka 2, muovikerroksen homeindeksit nousivat, mutteivät yltäneet homekasvun tasolle. Liima- ja laastikerroksissa puolestaan havaittiin huomattavasti korkeampia homeindeksejä. Teräsbetonivälipohjassa liimakerroksesta saatiin arvo 2,3 ja laastikerroksesta arvo 1,8. Maanvaraisessa teräsbetonialapohjassa

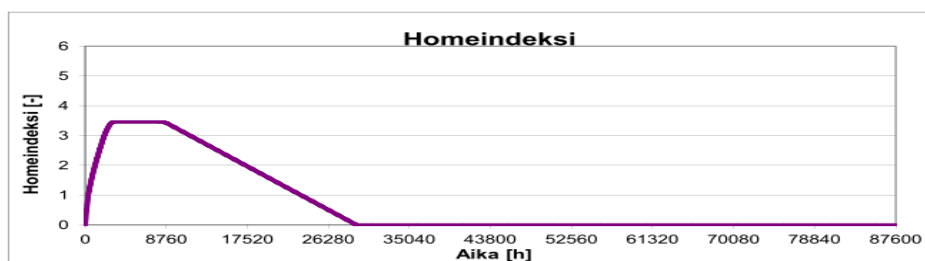
muovimatto saavutti homeindeksin arvon 0,945, joka ei vielä riitä kasvun alkamiseen. Liimakerroksesta havaittiin homeindeksi 2,4 ja laastikerroksesta puolestaan 3,1.

Homeindeksi vaihtelee siis erittäin paljon materiaalin homehtumisherkkyyssluokasta riippuen. Kuvioissa 9 ja 10 on esitetty 100 RH% aikana maalatun betonisandwich-seinän tasoitekerroksen homeindeksit. Kuviossa 9 käytettiin homehtumisherkkyyssluokkaa 3 ja kuvassa 10 homehtumisherkkyyssluokkaa 2. Maalin  $s_d$ -arvo oli 2 m.



Kuvio 9. Tasoitekerroksen sisäpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokka 3.

Kuviossa 9 homeindeksi nousee hieman alle vuodessa huippuunsa, muttei silti yllä arvoon 1. Homekasvua ei siis ilmene, vaikka pisteen RH on laskenut 85 %:iin vasta 10 kuukauden kuluttua pinnoituksesta.



Kuvio 10. Tasoitekerroksen sisäpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokka 2.

Kuviossa 10 homehtumisherkkyyssluokka on 2, jolloin homeindeksi nousee nopeasti ja saavuttaa korkeita arvoja. Tässä tapauksessa homeindeksi 1 saavutettiin noin kahden viikon kuluttua päällystyksestä. Maksimiarvon saavuttamiseen riitti muutama kuukausi.

Yllä olevista tapauksista voi päätellä, että materiaalien ominaisuuksien tunteminen on olennaista homehtumisriskiä arvioitaessa. Tästä syystä eri materiaalien homehtumista tulisi tutkia lisää, jotta homehtumisriskin arviointi olisi mahdollisimman tarkkaa.

## 7 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoite oli selvittää erilaisista betonirakenteiden pinnoitettavuuskriteereistä mahdollisesti johtuvaa homehtumisriskiä. Tutkimus tehtiin täysin simulointiohjelmistoilla sekä VTT-TTY homemallilla. Materiaaliarvot ja pinnoitusvaatimukset saatiin ammattikirjallisuudesta.

Tutkittavia rakenteita olivat teräsbetonivälipohja, ontelolaattavälipohja, teräsbetonialapohja sekä betonisandwich-seinä. Väli- ja alapohjarakenteiden kohdalla tutkittiin kolmea eri pinnoitetta: linoleumimattoa, muovimattoa ja keraamista laatoitusta. Betonisandwich-seinän tapauksessa käsiteltiin keraaminen laatoitus ja maalipinta.

On kuitenkin huomattava, että tutkimuksessa ei tehty laboratoriokokeita lainkaan, joten tulokset ovat teoreettisia. Lisäksi VTT-TTY homemalli käsittelee ainoastaan homehtumista. Se ei ota kantaa esimerkiksi kiinnitysliiman pilaantumiseen, maton kupruiluun tai sideaineksen hajoamiseen. On myös otettava huomioon, että homemalli simuloi yleistä homeen kasvua rakennusmateriaaleissa. Homeindeksin avulla ei ole mahdollista todeta terveyshaitan mahdollisuutta, sillä se ei ota kantaa homekasvuston toksisuuteen.

Tutkimuksessa havaittiin, että linoleumilla päällystetyssä teräsbetonivälipohjassa ja -alapohjassa on homeeriski. Linoleumipinnoitteen juuttikangas saavutti välipohjassa homeindeksin 1,9 ja alapohjassa 2,3. Muut pinnoitemateriaalit eivät kokeissa saavuttaneet homeindeksiä 1. Jos homehtumisherkkyyssluokan 3 materiaaleilla, kuten liimalla, laastilla ja seinätasoitteella, olisi käytettykin herkkyyssluokkaa 2, homeetta olisi esiintynyt myös näissä kerroksissa.

Myös tuulettamattoman betonisandwich-seinän mineraalivillakerroksessa havaittiin homeeriski. Kokeissa kuitenkin todettiin, että niissä tarkastelupisteissä, joissa homeetta ilmeni, sen kasvu on väistämätöntä. Homeindeksi nousi kaikissa betonisandwich-seinämalleissa, mineraalivillan ja ulkokuoren rajapinnassa huomattavasti yli arvon 2, riippumatta rakenteen pintamateriaaleista tai pinnoituksen ajankohdasta. Näiden kokeiden perusteella voi todeta, että linoleumimaton alustakosteusvaatimukset tulisi tarkastaa tai linoleumipinnoitteista tulisi jättää juuttikangas pois.

Kaiken kaikkiaan, VTT-TTY homemalli vaikuttaa hyödylliseltä työkalulta rakenteiden homeeriskin kartoitukseen, kunhan tietää materiaalien koostumuksen ja homehtumis-

herkkyyden. Materiaalien homehtumista tulisi tutkia lisää, jotta VTT-TTY homemallista saataisiin luotettavampi työkalu.

## Lähteet

- 1 Asumisterveysopas. 2009. Helsinki: Ympäristö ja Terveys-lehti.
- 2 SisäRYL 2013 Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset. Talonrakennuksen sisätyöt. 2013. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 3 Mäkitalo, Mikael. 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 4 Hens, Hugo. 2007. Building Physics – Heat, Air and Moisture. Berlin: Ernst & Sohn.
- 5 Hagentoft, Carl-Eric. 2001. Introduction to Building Physics. Lund: Studentlitteratur.
- 6 Björkholz, Dick. 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Rakennustieto: Helsinki.
- 7 Suvanto, Kari. 2008. Tekniikan fysiikka 1. Edita Publishing Oy: Helsinki
- 8 Jylhä, Kirsti ym. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. Tutkimusraportti. Ilmatieteen laitos.
- 9 BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2004. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy
- 10 Merikallio, Tarja. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja. TKK
- 11 Hogan, Michael. 2012. Extremophile. Verkkodokumentti.  
<<http://www.eoearth.org/view/article/160977>>. Luettu 4.7.2013.
- 12 RIL 250-2011 Kosteuden hallinta ja homevaurioiden estäminen. 2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 13 Vinha, J. ym. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos.
- 14 Vinha, Juha. 2013. VTT-TTY homemallin taulukkolaskentapohja. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 15 WUFI PRO 5.2 –ohjelman help-toiminto. 2013. Fraunhofer IBP.

- 16 WUFI 2D 3.3 –ohjelman help-toiminto. 2013. Fraunhofer IBP.
- 17 Fraunhofer IBP. 2013. Verkkodokumentti. < <http://www.fraunhofer.de/en/about-fraunhofer.html>> Luettu 1.9.2013.
- 18 By 45 / BLY 7 Betonilattiat. 2002. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys Oy.
- 19 By 47 Betonirakentamisen laatuohjeet. 2013. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys Oy.
- 20 RIL 107-2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. 2012. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 21 Ratu 75-0313 Mattotyöt, kuivat tilat. 2008. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 22 Vinha, Juha. 2013. Rakennustekniikan professori, Tampereen teknillinen yliopisto. Sähköpostikeskustelu 2.10.2013.
- 23 Leivo, Virpi & Rantala, Jukka. 2002. Maanvastaiset alapohjarakenteet - Kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. Suunnitteluopas. Tampereen teknillinen yliopisto.



## WUFI-ohjelmissa käytetyt materiaaliarvot

Taulukko 1. Materiaalien perusarvot.

Materiaali	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Huokoisuus [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/(kg*K)]	Lämmön- johtavuus [W/(mK)]	Vesihöyryn diffuusio- kerroin [-]	Lähde
Linoleumimatto 2,5 mm	1160	0,23	1400	1,0	3615	1)
Pinnoiteliima 1 mm	1300	0,001	1000	1,0	2214	1)
Muovimatto 2 mm	1500	0,001	1295	1,0	16758	1)
Lattiadispersio- pohjuste 1 mm	1000	0,001	1000	1,0	410	1)
Betoni C35/45	2220	0,18	850	1,6	248	2)
Lattiatasoite	1782	0,34	850	1,7	45,5	2)
Solumuovieriste	60	0,95	1500	0,037	150	3)
Tartuntalaasti	1700	0,24	850	1,0	18	3)
Keraaminen laatta	2000	0,001	850	1,2	300	2)
Ilmakerros 150 mm	1,3	0,999	1000	0,94	0,07	2)
Ilmakerros 130 mm	1,3	0,999	1000	0,79	0,1	2)
Ilmakerros 25 mm	1,3	0,999	1000	0,155	0,51	2)
Seinätasoite	1782	0,34	850	1,7	45,5	2)
Lähteet						
1) Lindberg, Ralf ym. 2002. Kosteusvirta-tutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu.						
2) WUFI-ohjelmien materiaalikirjastot. 2013.						
3) Vinha, Juha ym. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen korkeakoulu.						

Taulukko 2. Materiaalien tasapainokosteuskäyrät.

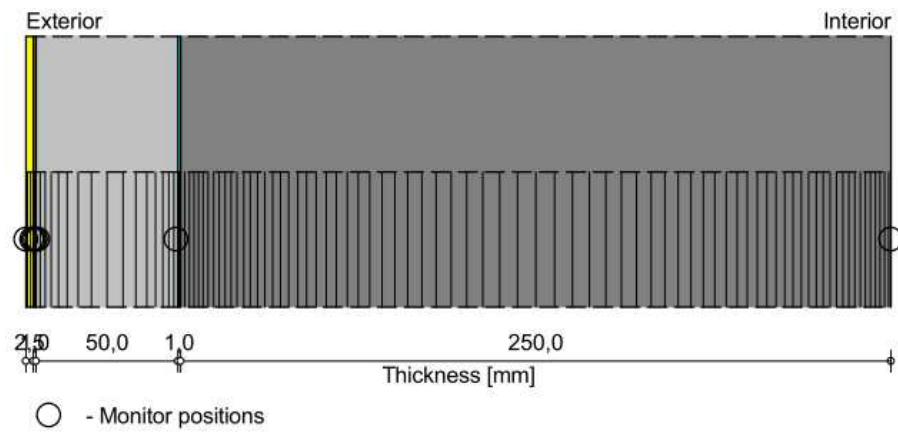
Betoni C35/45	RH [%]	0	33	43	63	80	83	93	100
	w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	37	38	65	75	76	104	147
Lattiatasoite	RH [%]	0	35	50	70	80	90	95	100
	w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	22,5	32,5	42,5	49	57,5	67,5	100
Solumuovieriste	RH [%]	0	35	50	70	80	90	98	100
	w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	0,12	0,17	0,2	0,21	0,28	0,38	45
Tartuntalaasti	RH [%]	0	50	80	90	99	99,9	100	
	w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	30	45	65	95	110	210	

## **Teräsbetonivälipohjalaatan tulokset**






Tässä liitteessä esitetään teräsbetonilaatan rakennemallit tarkastelupisteineen sekä RH- ja homeindeksikuvaajat. Välipohjalaatassa mallin molemmat rajapinnat ovat vakio-lämpötilassa, joten lämpötilakuvaajia ei esitetä. Tarkastelupisteinä on käytetty materiaalikerrosten ylä- ja alapintoja. Mallissa on tarkasteltu materiaalikerroksia, jotka ovat kosketuksissa pintamateriaalikerrosten kanssa.

Linoleumimattopinnoitteella ja käytetään herkkä-homehtumisluokkaa. Linoleumin alustana olevan juuttikankaan arvioitiin kuuluvan hyvin herkkä -luokkaan. Mattopinnoitteella, pinnoiteliimalla, keraamisella laattalla ja sen kiinnitys- ja saumalaastilla käytetään kohtalaisen kestävä -luokkia. Betonilla käytetään kestävä-luokkia. Herkkyysluokat materiaaleille on valittu homemallin mukaan, pois lukien linoleumimatto ja sen liima. Näitä aineita ei tutkittu homemallihankkeessa. Näille aineille valittiin tapauskohtaisesti herkkyysluokka esimerkkimateriaalien mukaan.

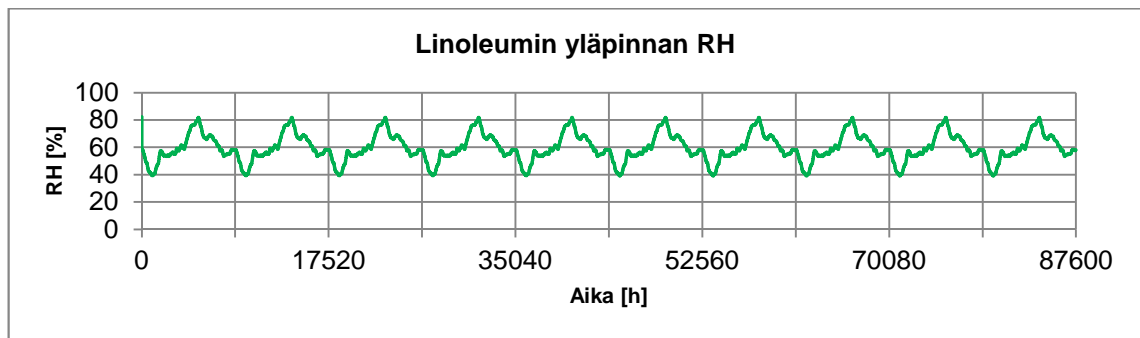
### Linoleumipinnoite



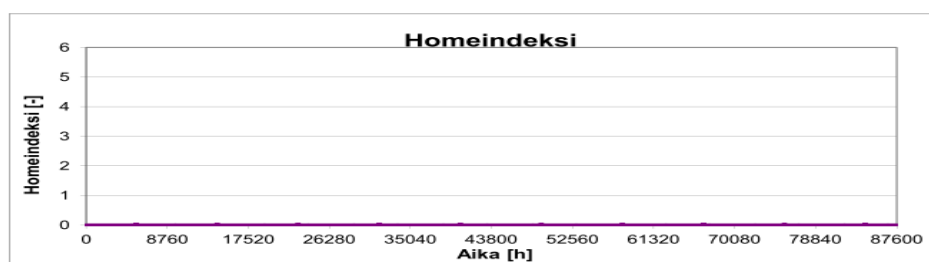
#### Materials :

-  - \*Linoleum UPOFLOOR
-  - \*CascoProff Solid -Liima
-  - \*Floor leveling compound
-  - \*Vetonit lattiadispersio
-  - \*Concrete, C35/45

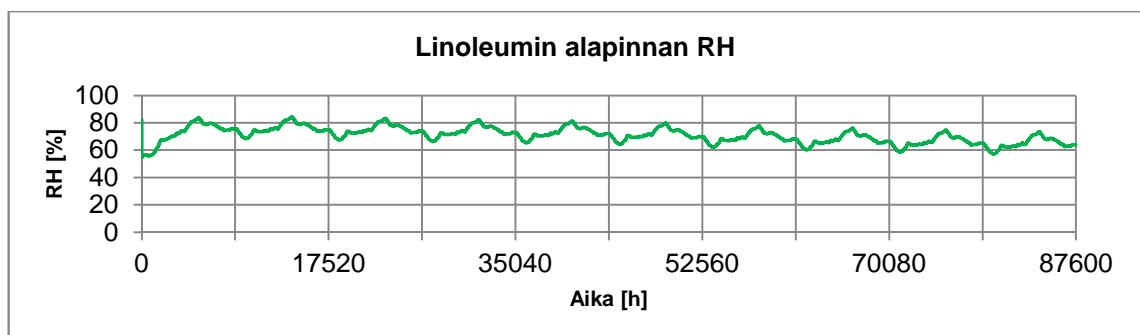
Kuva 1. Linoleumilla päällystetyn teräsbetonivälipohjan rakennemalli.



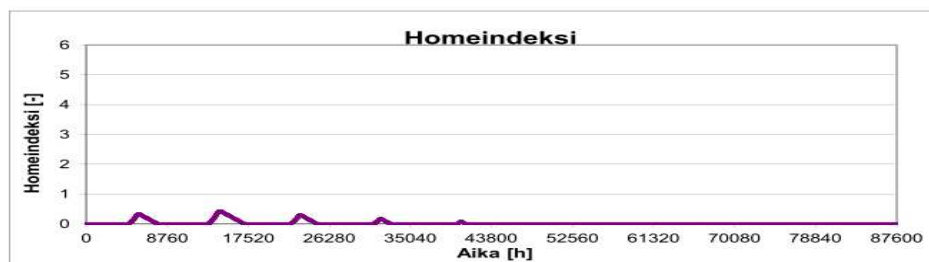
Kuvio 1. Linoleumimaton yläpinnan suhteellinen kosteus.



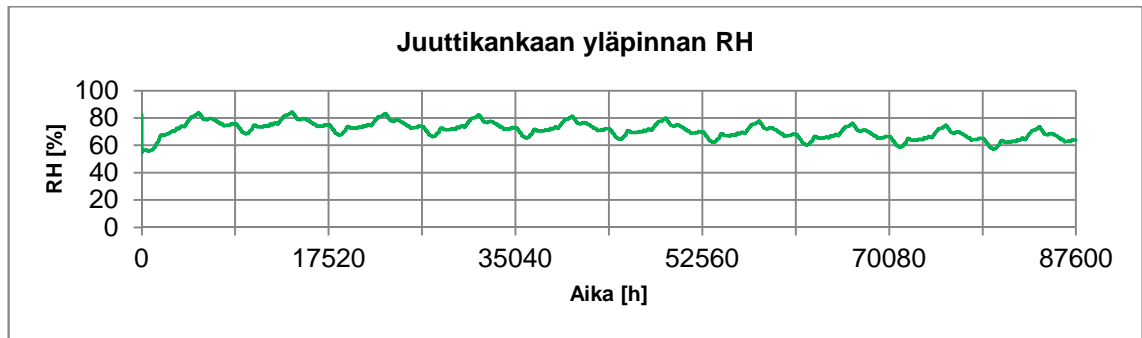
Kuvio 2. Linoleumin yläpinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 2. Suurin homeindeksi 0.024.hetkellä 5388...5391 h.



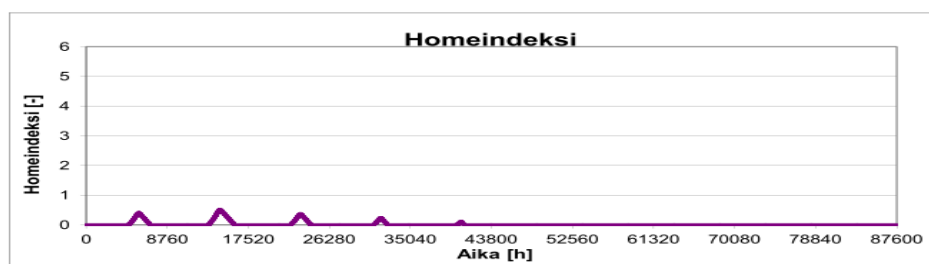
Kuvio 3. Linoleumimaton alapinnan suhteellinen kosteus.



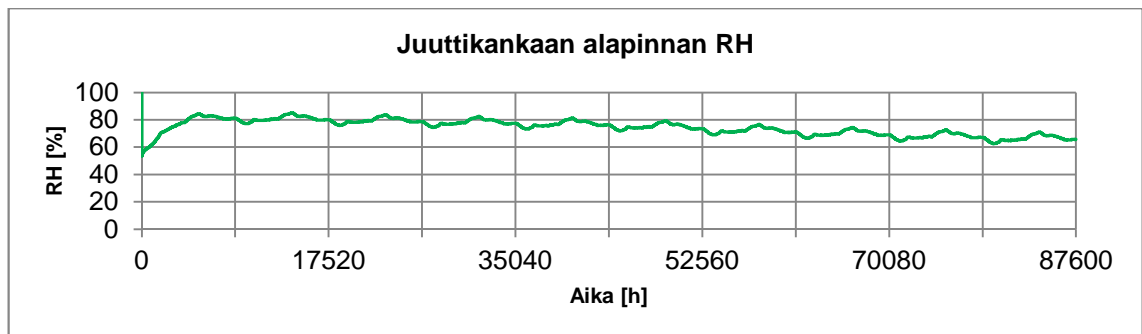
Kuvio 4. Linoleumin alapinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka1, maksimimääräluokka 2. Suurin homeindeksi 0,43 hetkellä 14414...14484 h.



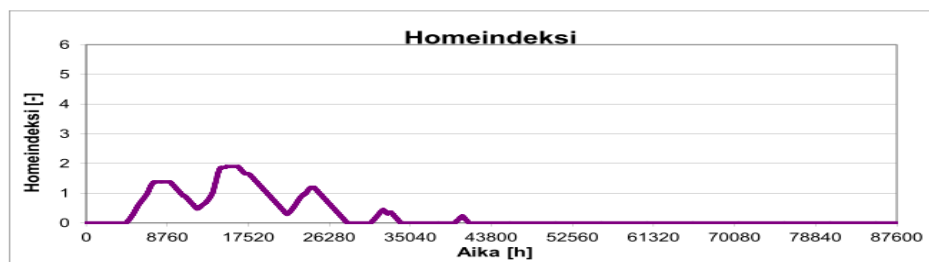
Kuvio 5. Juuttikankaan yläpinnan suhteellinen kosteus.



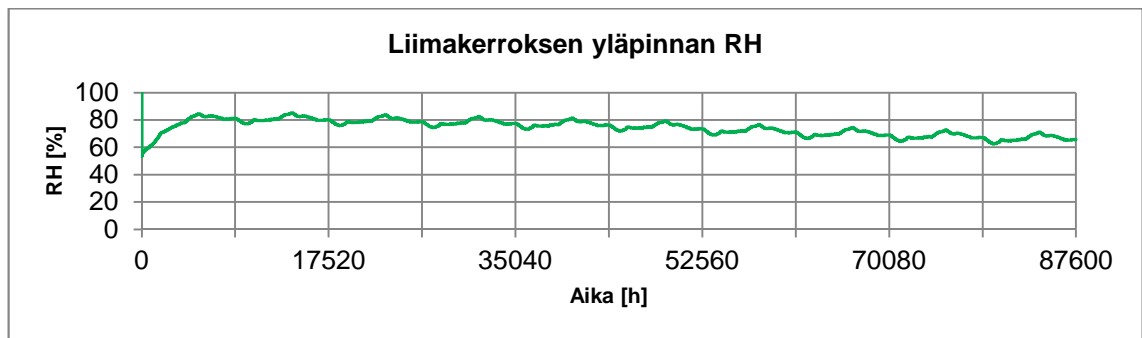
Kuvio 6. Juuttikankaan yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssuokat 1. Suurin homeindeksi 0,516 hetkellä 14481...14483 h.



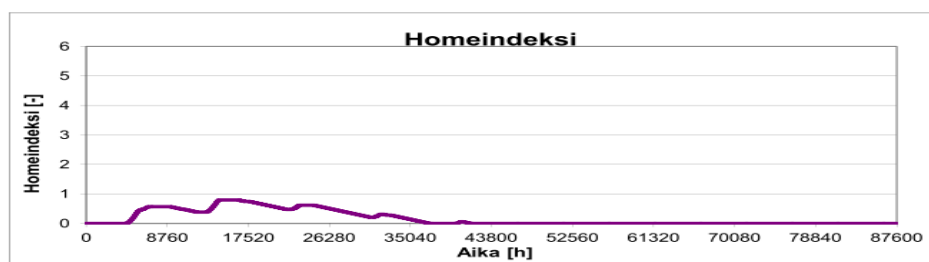
Kuvio 7. Juuttikankaan alapinnan suhteellinen kosteus.



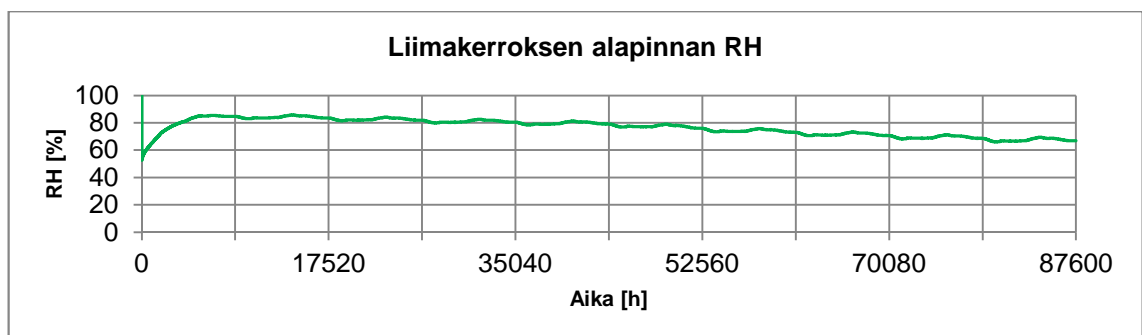
Kuvio 8. Juuttikankaan alapinnan homeindeksi. Herkkyyssuokat 1. Suurin homeindeksi 1,904 hetkellä 15379...16387 h.



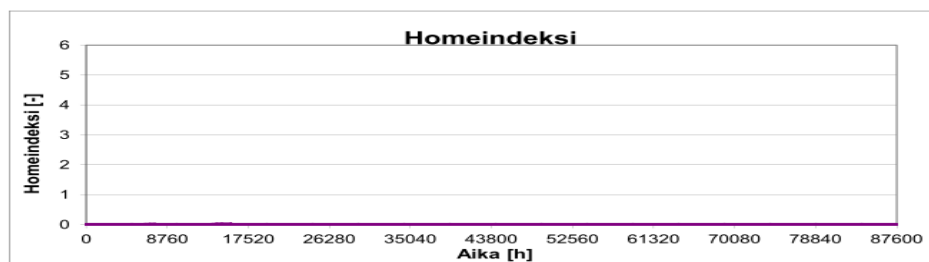
Kuvio 9. Liimakerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



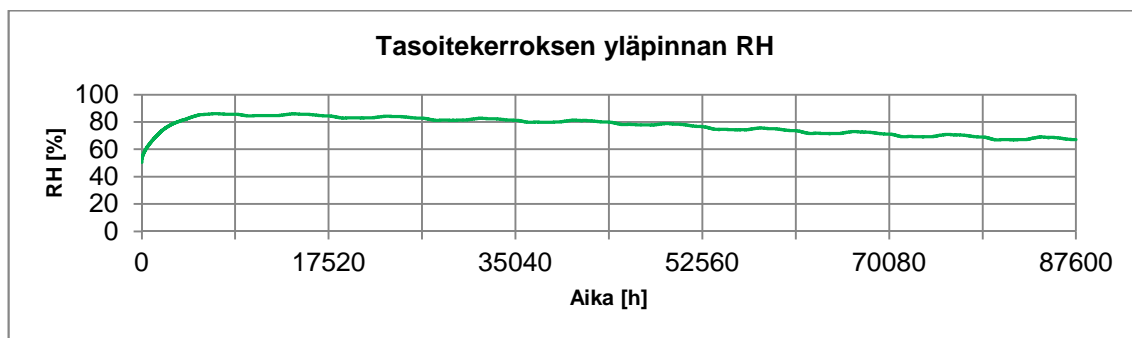
Kuvio 10. Liimakerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 1, maksimimääräluokka 3. Suurin homeindeksi 0,796 hetkellä 14423...16388 h.



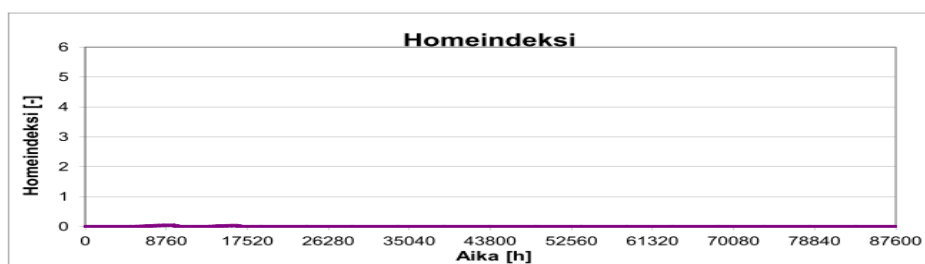
Kuvio 11. Liimakerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



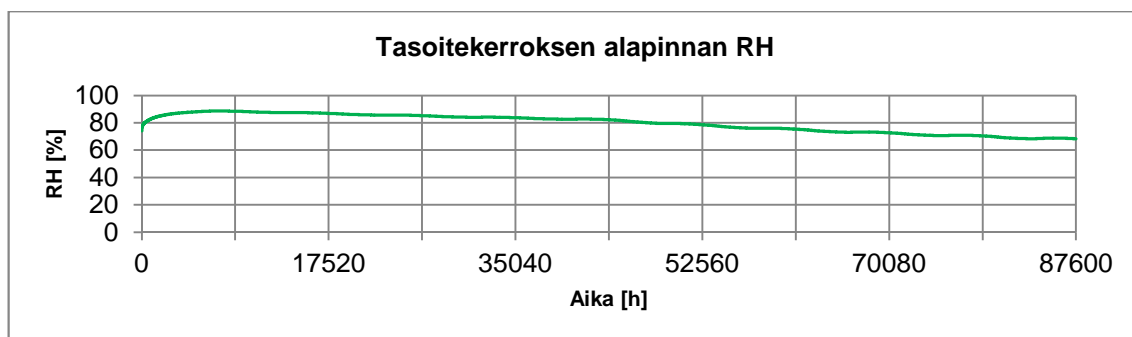
Kuvio 12. Liimakerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,016 hetkellä 15080...15437 h.



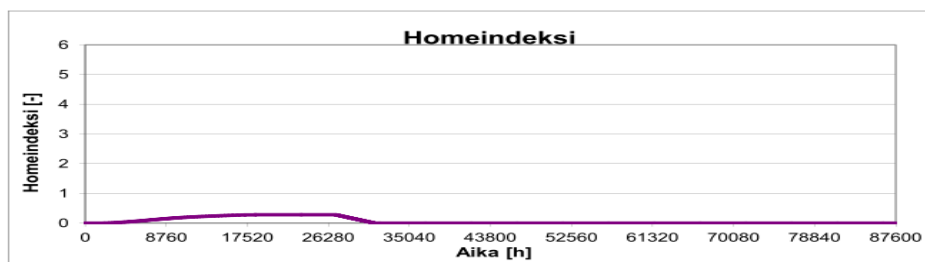
Kuvio 13. Tasoitekerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 14. Tasoitteen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,045 hetkellä 9029...9480 h.

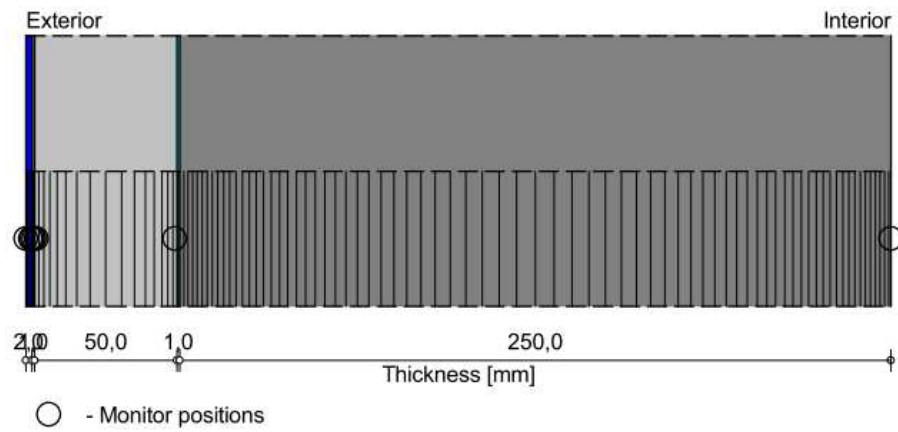


Kuvio 15. Tasoitekerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.

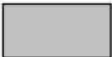



Kuvio 16. Tasoitteen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 4. Suurin homeindeksi 0,278 hetkellä 18232...27097 h.

## Muovimatto

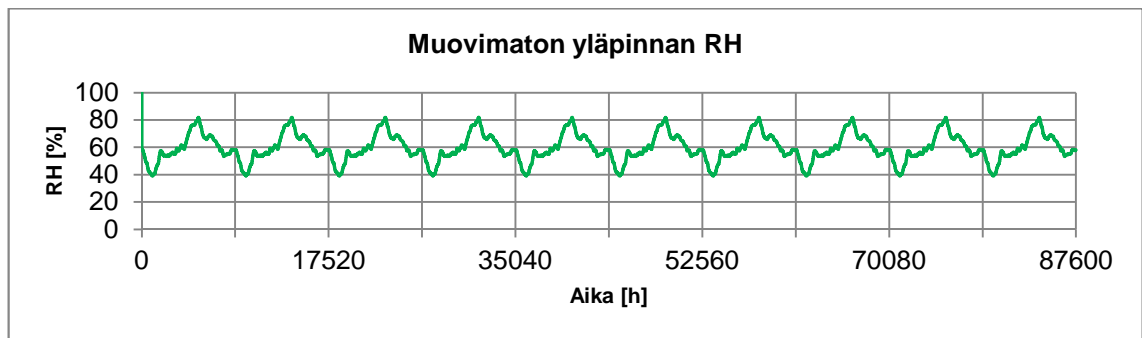


### Materials :

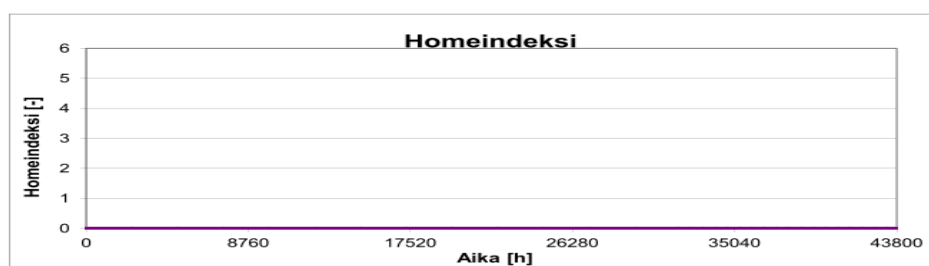
-  - \*Estrad-muovimatto
-  - \*CascoProff Solid -Liima
-  - \*Floor leveling compound
-  - \*Vetonit lattiadispersio
-  - \*Concrete, C35/45

Kuva 2. Muovimatolla päällystetyn teräsbetonivälipohjan rakennemalli.

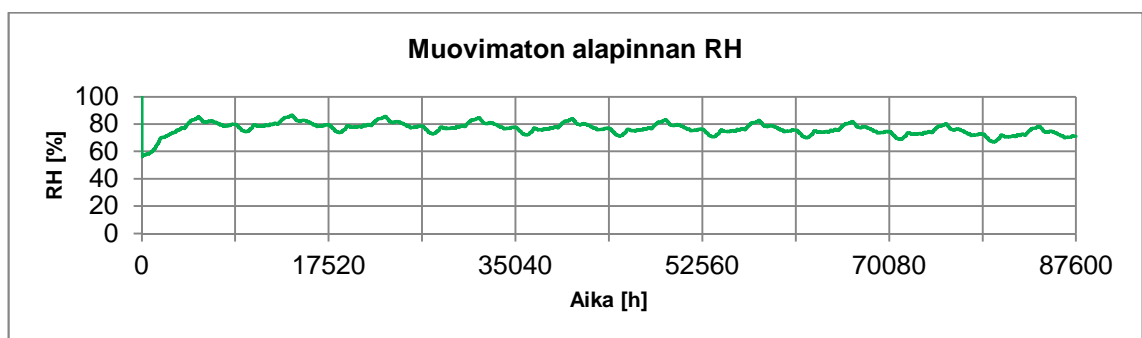




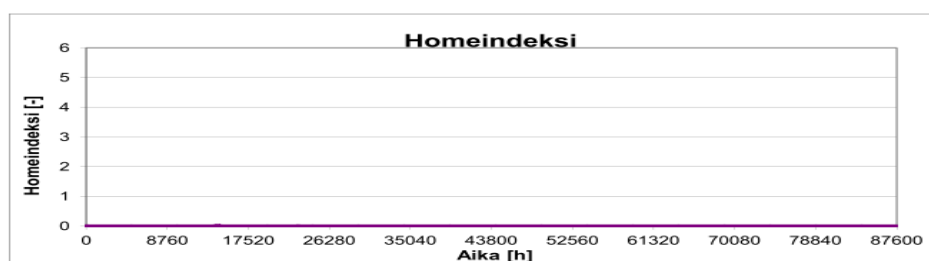
Kuvio 17. Muovimaton yläpinnan suhteellinen kosteus



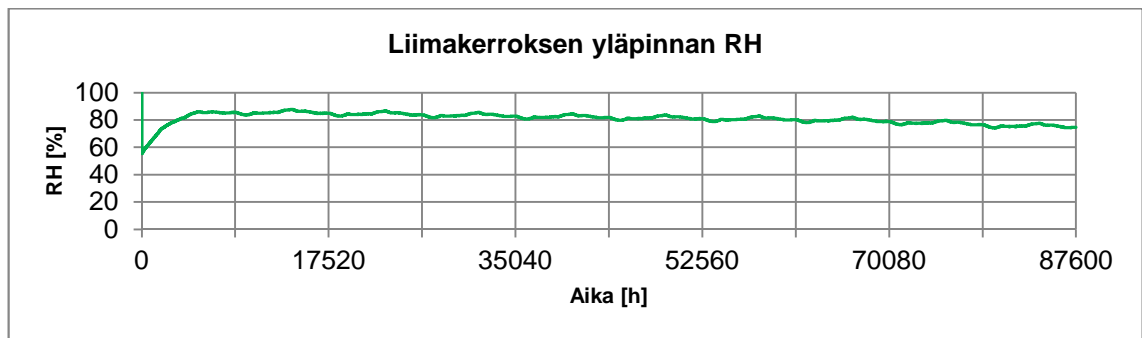
Kuvio 18. Muovimaton yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0.



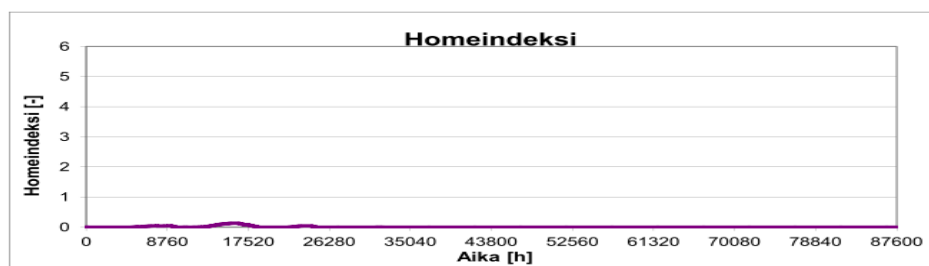
Kuvio 19. Muovimaton alapinnan suhteellinen kosteus.



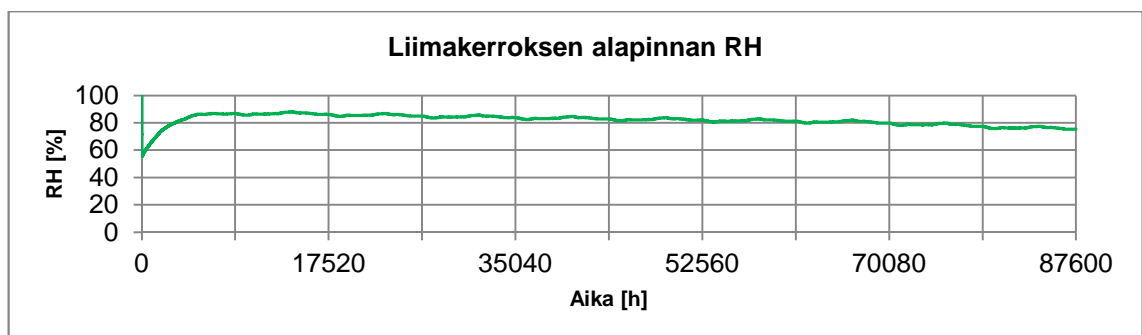
Kuvio 20. Muovimaton alapinnan homeindeksi. Suurin homeindeksi 0,012 hetkellä 14189...14253 h.



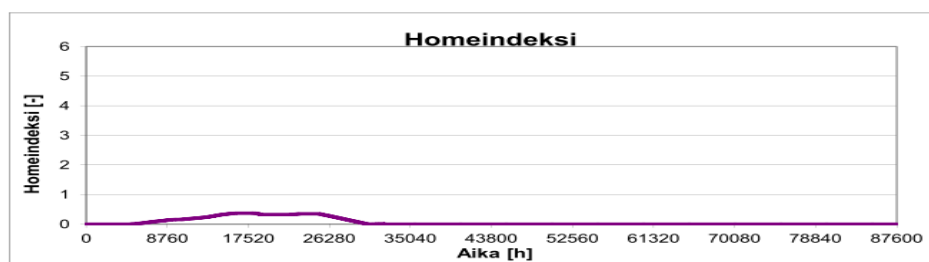
Kuvio 21. Liimakerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



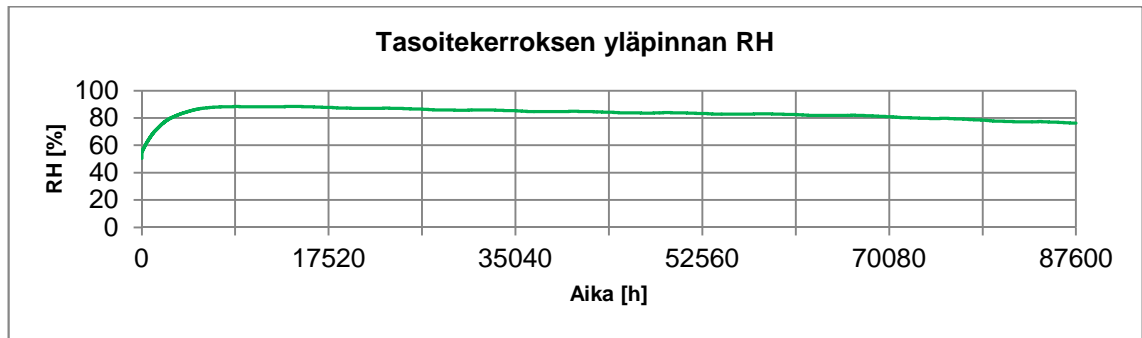
Kuvio 22. Liimakerroksen yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,134 hetkellä 16000...16372 h.



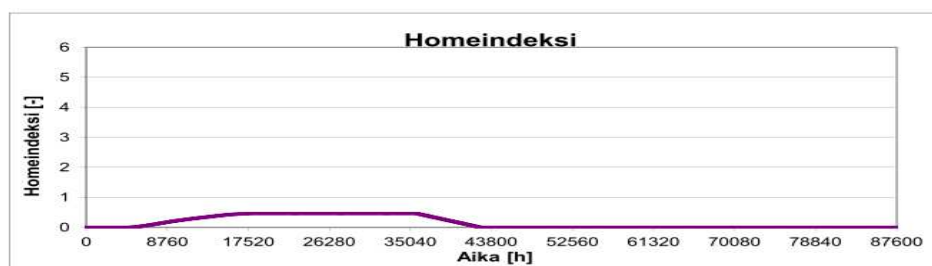
Kuvio 23. Liimakerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



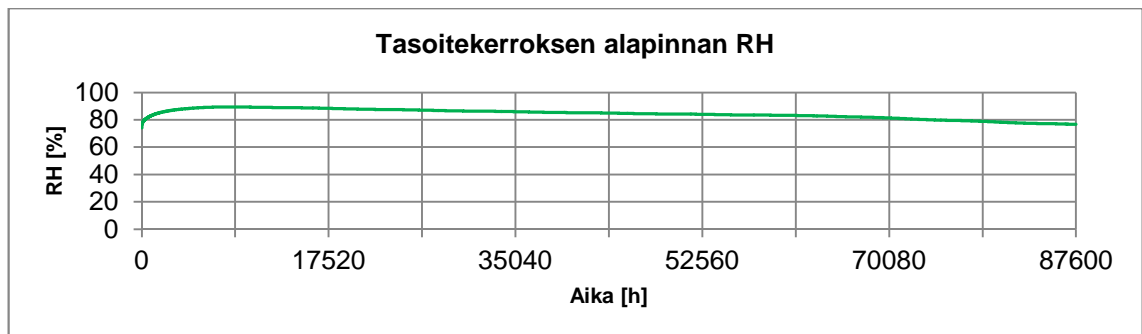
Kuvio 24. Liimakerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,371 hetkellä 17589...18246 h.



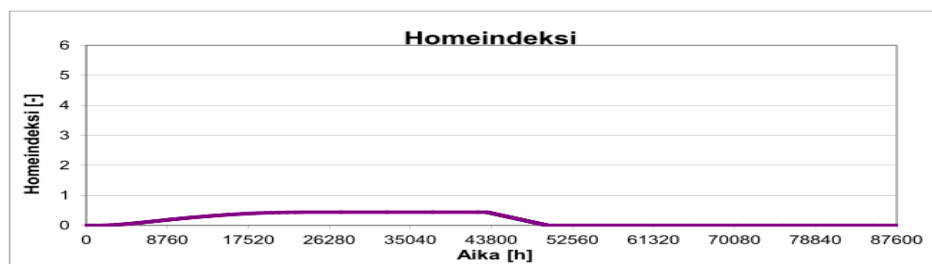
Kuvio 25. Tasoitekerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 26. Tasoitekerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4.. Suurin homeindeksi 0,461 hetkellä 18080...35698 h.

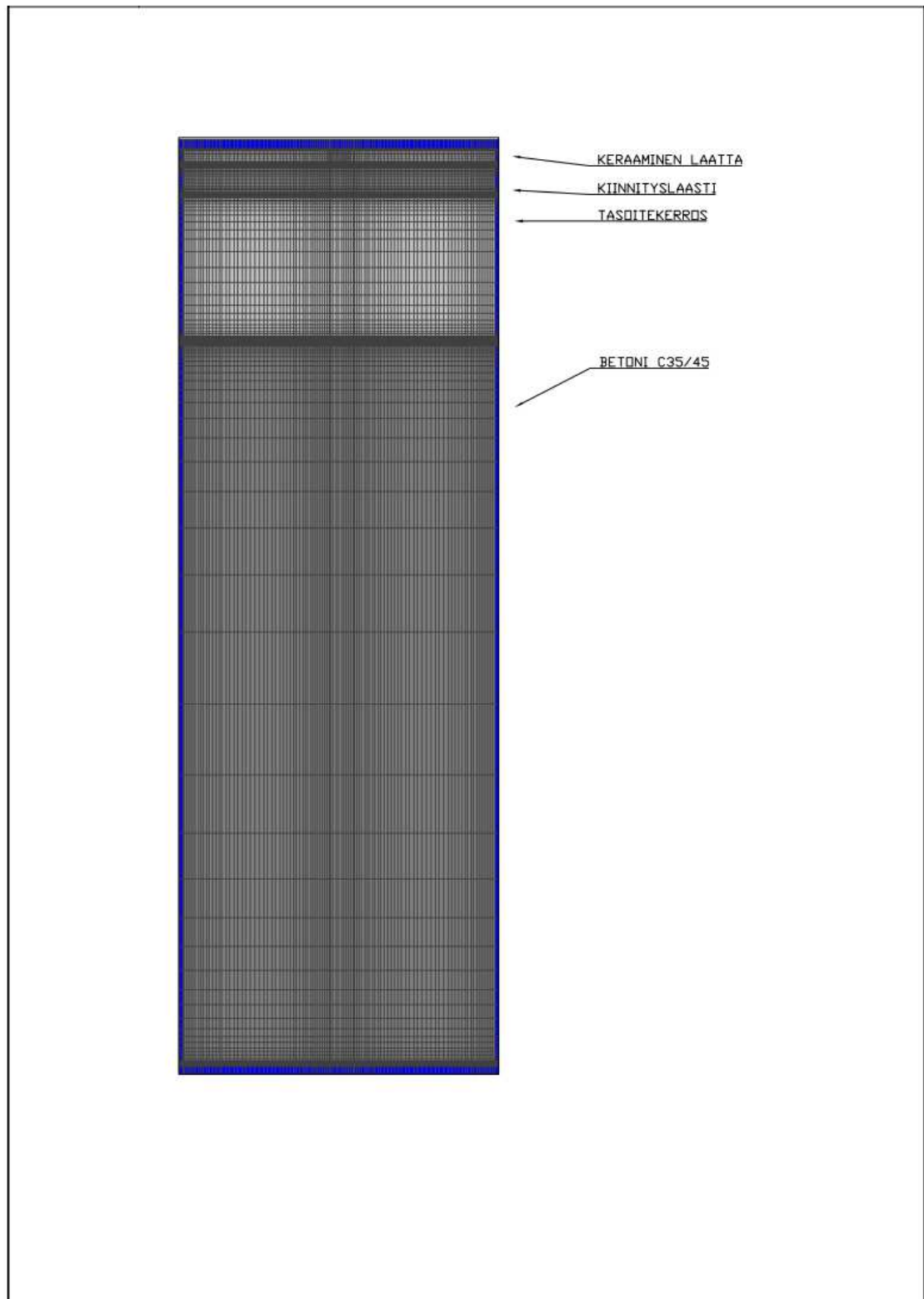


Kuvio 27. Tasoitekerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.

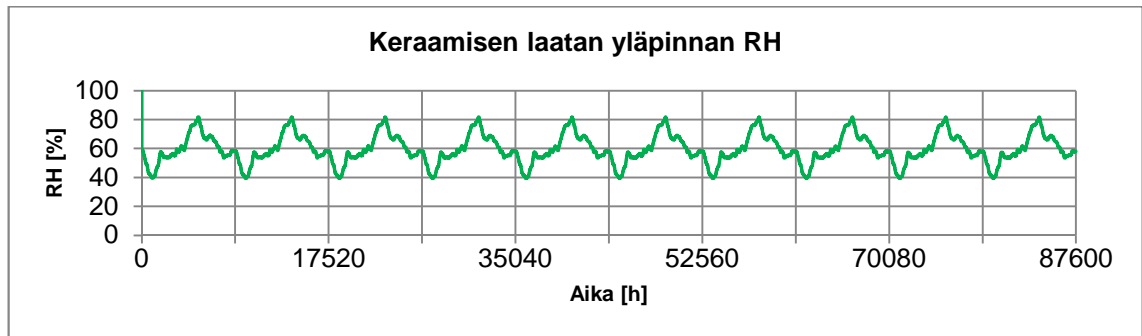


Kuvio 28. Tasoitekerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 4. Suurin homeindeksi 0,438 hetkellä 23870...43288 h.

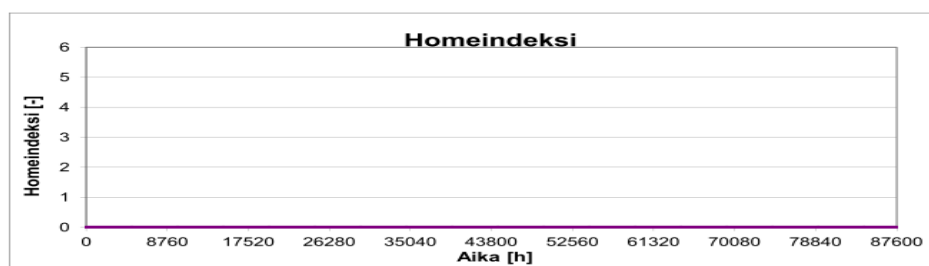
*Keraaminen laatta*



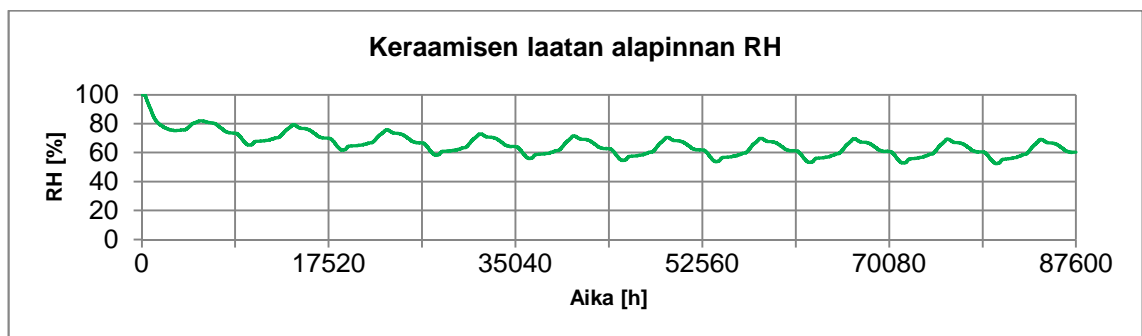
Kuva 3. Laatoitetun teräsbetonivälipohjan rakennemalli.



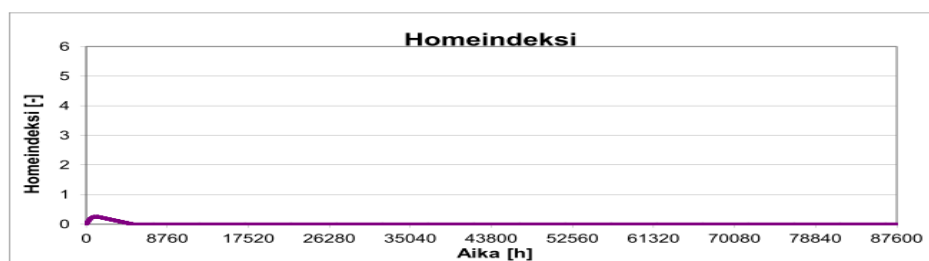
Kuvio 29. Keraamisen laatan yläpinnan suhteellinen kosteus.



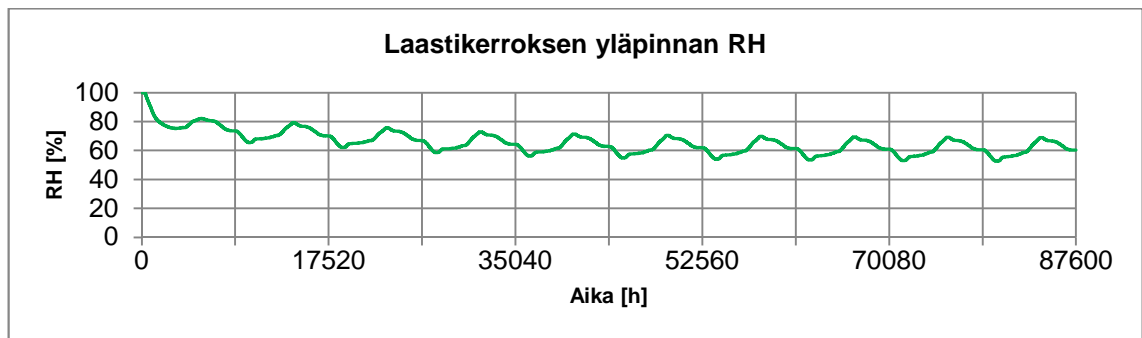
Kuvio 30. Keraamisen laatan yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0.



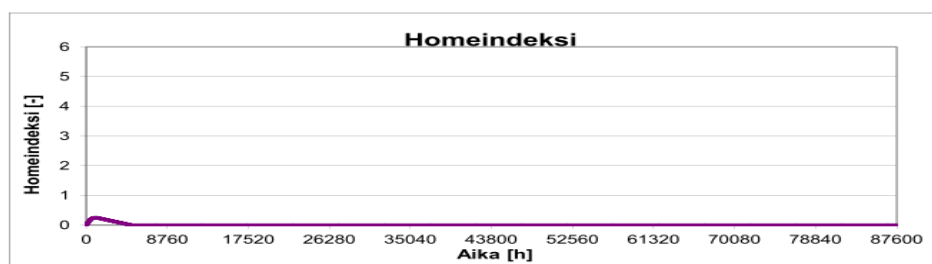
Kuvio 31. Keraamisen laatan alapinnan suhteellinen kosteus.



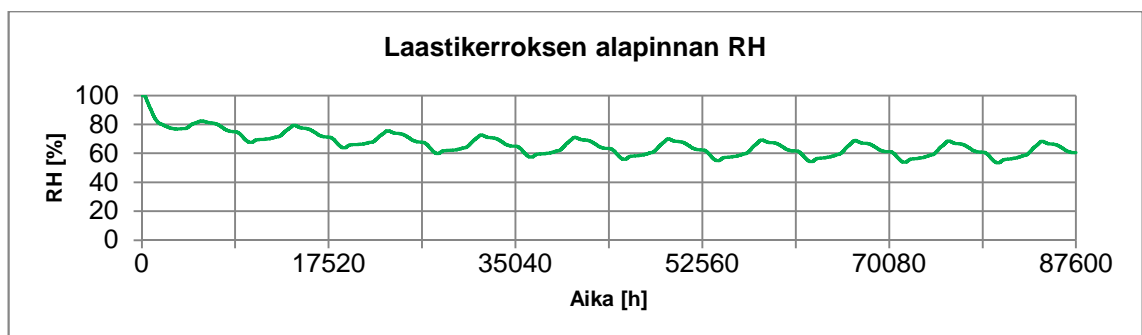
Kuvio 32. Keraamisen laatan alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,26 hetkellä 1018...1102 h.



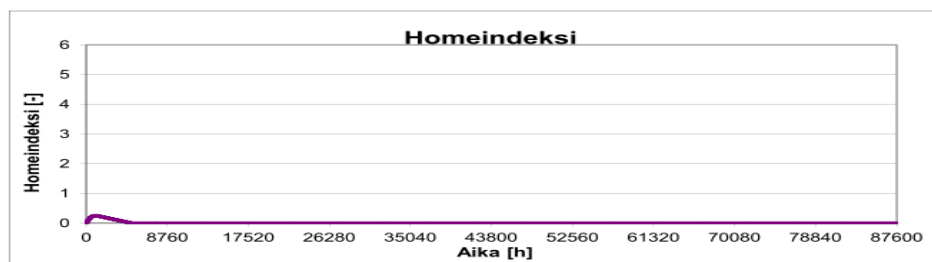
Kuvio 33. Laastikerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



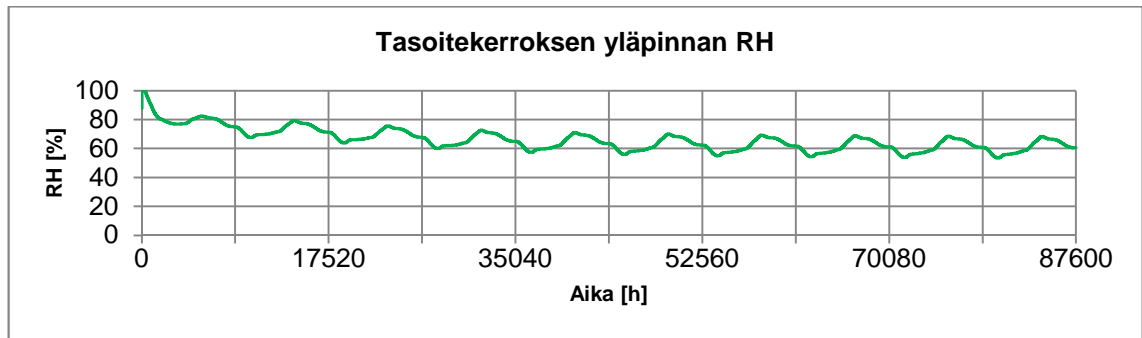
Kuvio 34. Laastikerroksen yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssuorat 3. Suurin homeindeksi 0,26  
hetkellä 956...1130 h.



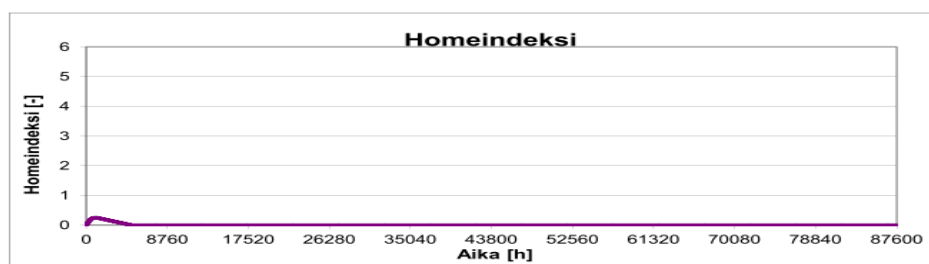
Kuvio 35. Laastikerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



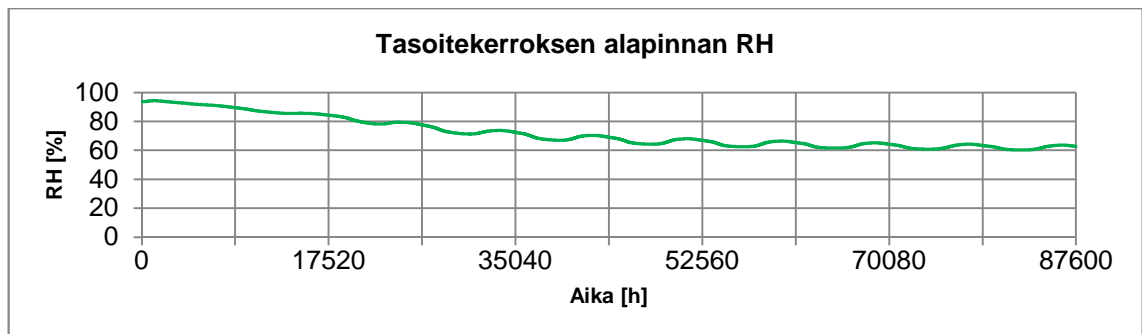
Kuvio 36. Laastikerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssuorat 3. Suurin homeindeksi 0,27  
hetkellä 1019...1198 h.



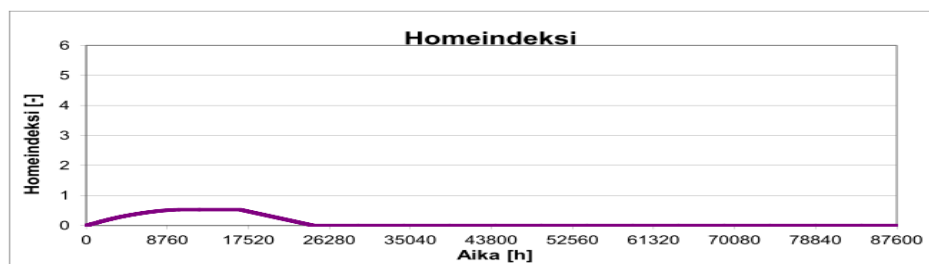
Kuvio 37. Tasoitekerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 38. Tasoitekerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,259 hetkellä 1015...1202 h.



Kuvio 39. Tasoitekerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 40. Tasoitekerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 4. Suurin homeindeksi 0,526 hetkellä 10062...16647 h.

## **Ontelolaattavälipohjan tulokset**

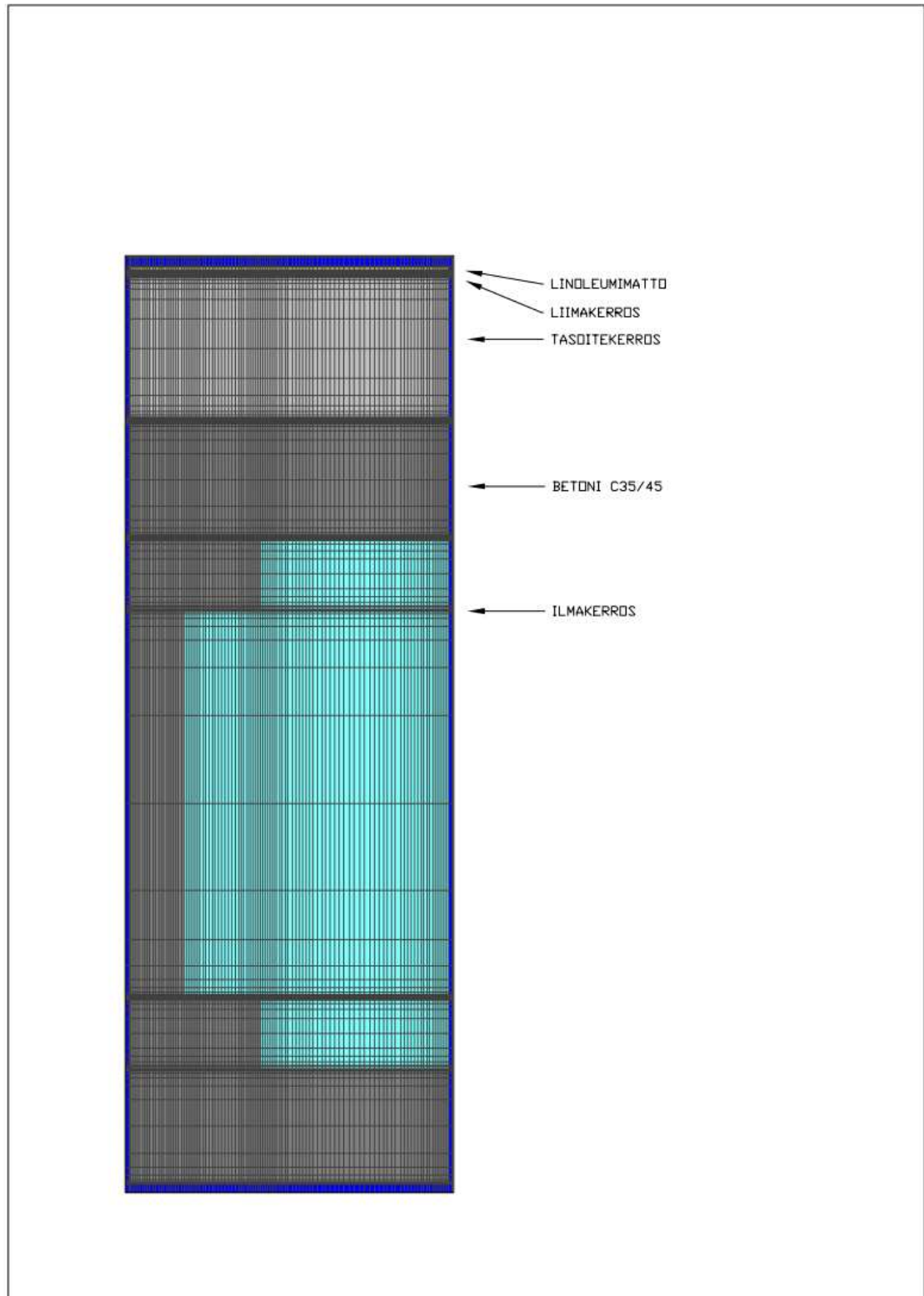
Tässä liitteessä esitetään ontelolaattavälipohjan rakennemallit tarkastelupisteineen, RH-, ja homeindeksikuvaajat. Tarkastelupisteinä on käytetty materiaalikerrosten sisä- ja ulkopintoja. Mallissa on tarkasteltu materiaalikerroksia, jotka ovat kosketuksissa pintamateriaalikerrosten kanssa.

Linoleumimattopinnoitteella ja käytetään herkkä-homehtumisluokkia. Linoleumin alustana olevan juuttikankaan arvioitiin kuuluvan hyvin herkkä -luokkaan. Mattopinnoitteella, pinnoiteliimalla, keraamisella laattalla ja sen kiinnitys- ja saumalaastilla käytetään kohtalaisen kestävä -luokkia. Betonilla käytetään kestävä-luokkia. Herkkyysluokat materiaaleille on valittu homemallin mukaan, pois lukien linoleumimatto ja sen liima. Näitä aineita ei tutkittu homemallihankkeessa. Näille aineille valittiin tapauskohtaisesti herkkyysluokka esimerkkimateriaalien mukaan.

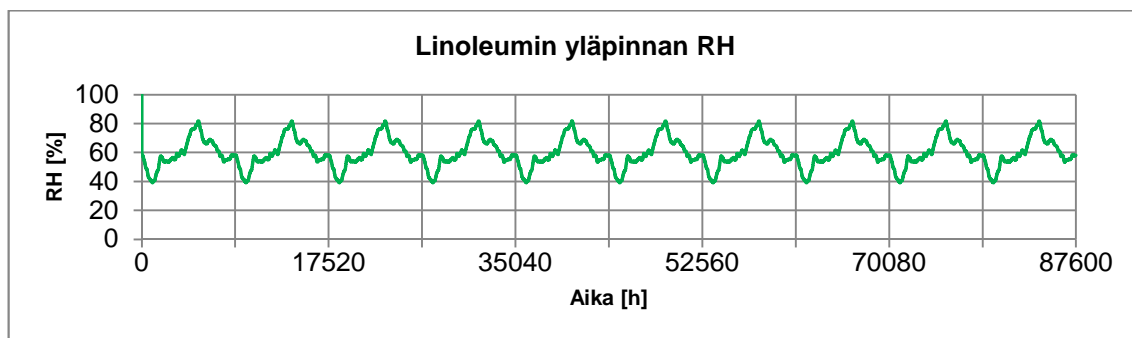
Ontelolaatan mallintamiseen tarvittiin 2D-mallinnusohjelmaa, jotta ontelolaatan onteloiden vaikutus voitaisiin huomioida. Tässä tarkastelussa ontelolaatasta mallinnettiin pienin symmetrinen osa eli yksi ontelovälin puolikas.



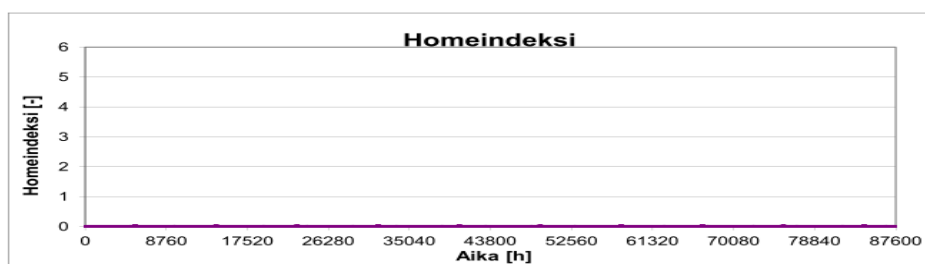
*Linoleumipinnoite*



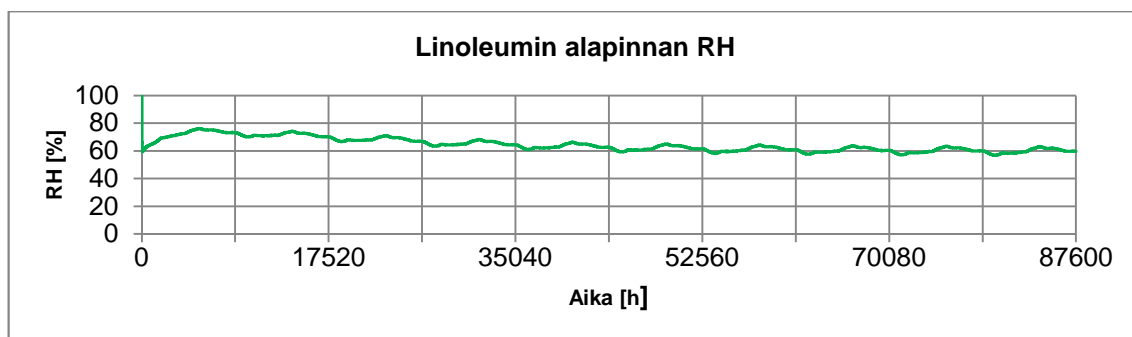
Kuva 1. Linoleumilla päällystetyn ontelolaattavälipohjan rakennemalli.



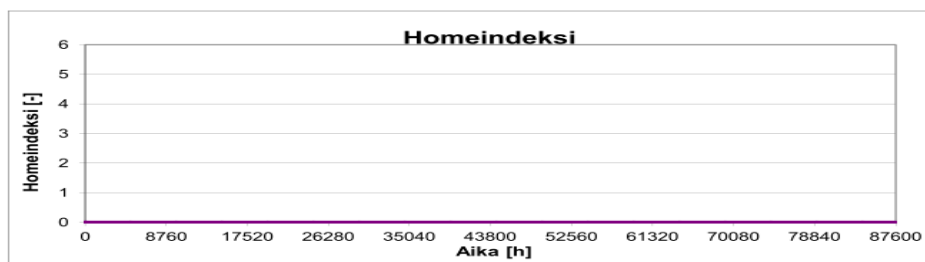
Kuvio 1. Linoleumimaton yläpinnan suhteellinen kosteus.



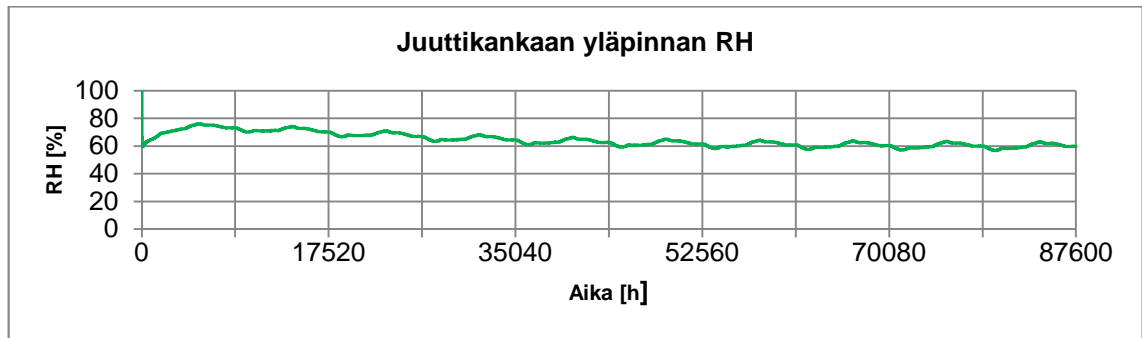
Kuvio 2. Linoleumin yläpinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 2. Suurin homeindeksi 0,024 hetkellä 5388...5391 h.



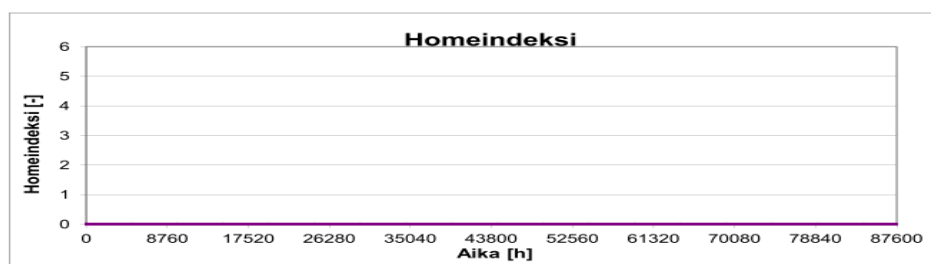
Kuvio 3. Linoleumimaton yläpinnan suhteellinen kosteus.



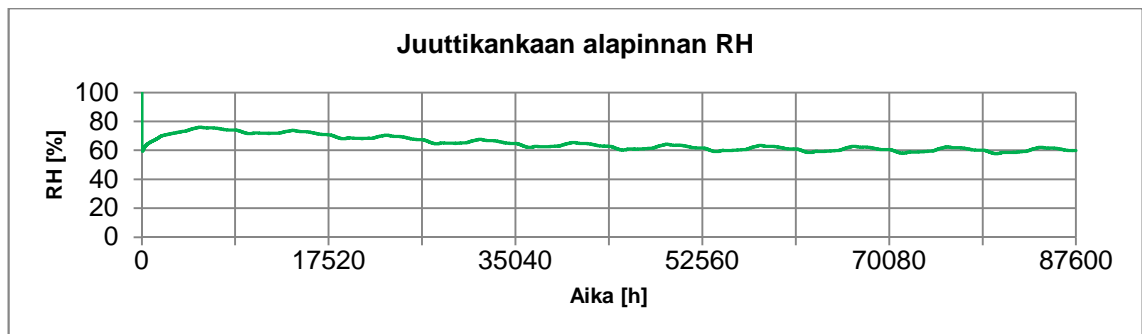
Kuvio 4. Linoleumin alapinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 1, maksimimääräluokka 2. Suurin homeindeksi 0,01 hetkellä 2...5 h.



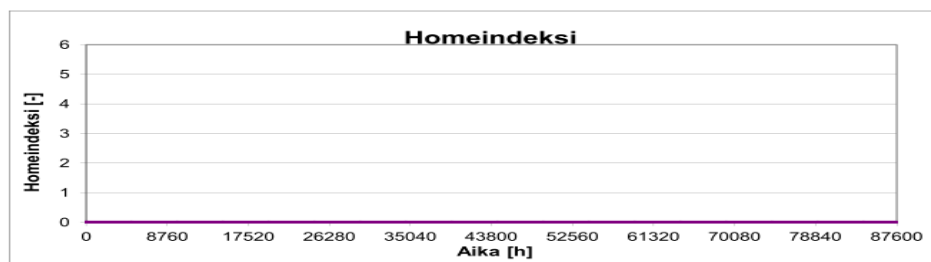
Kuvio 5. Juuttikankaan yläpinnan suhteellinen kosteus.



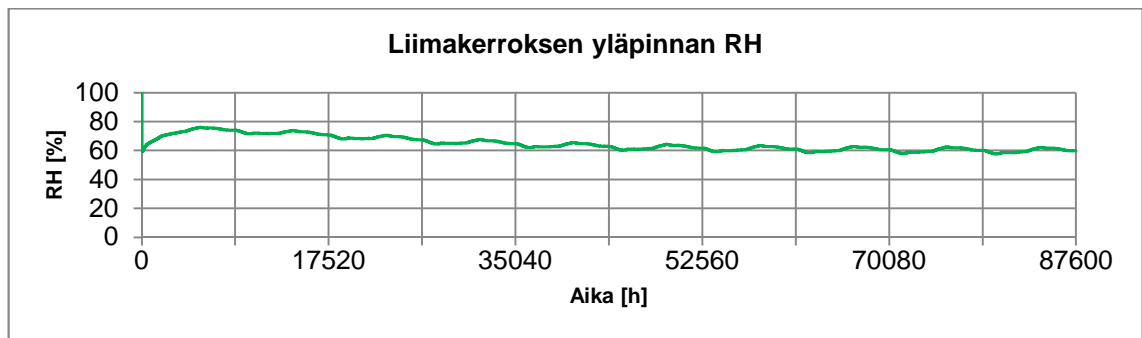
Kuvio 6. Juuttikankaan yläpinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 1. Suurin homeindeksi 0,01 hetkellä 2...4 h.



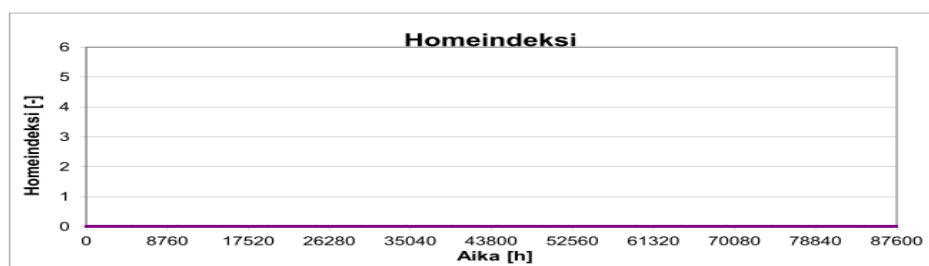
Kuvio 7. Juuttikankaan alapinnan suhteellinen kosteus.



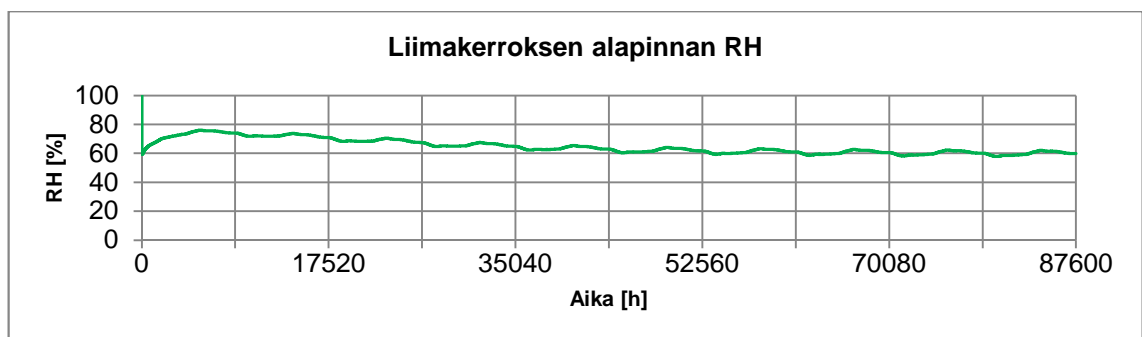
Kuvio 8. Juuttikankaan alapinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 1. Suurin homeindeksi 0.



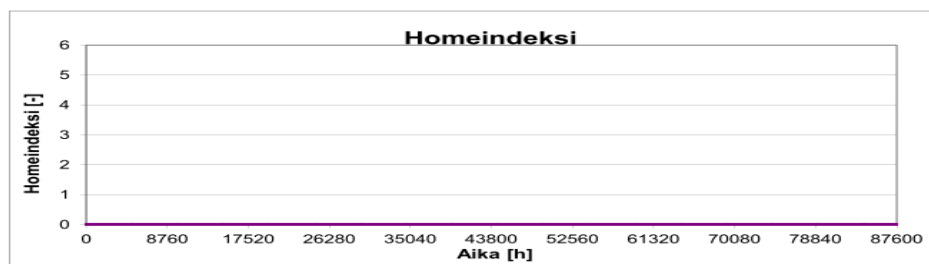
Kuvio 9. Liimakerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



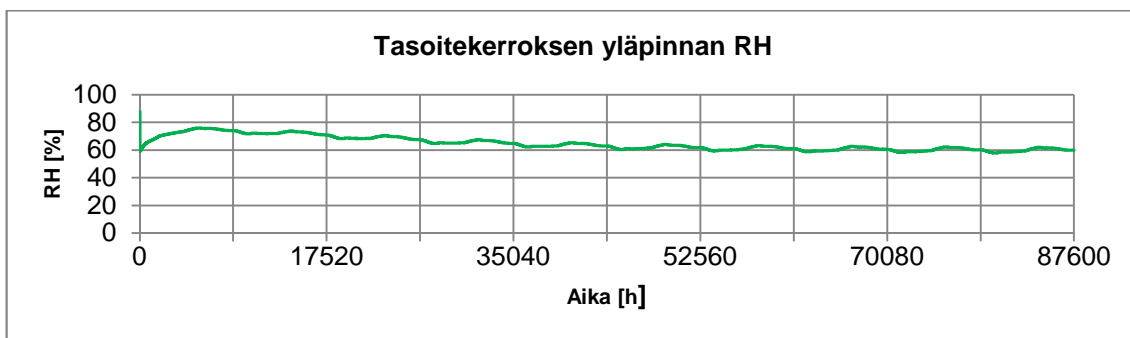
Kuvio 10. Liimakerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 1, maksimimääräluokka 3. Suurin homeindeksi 0.



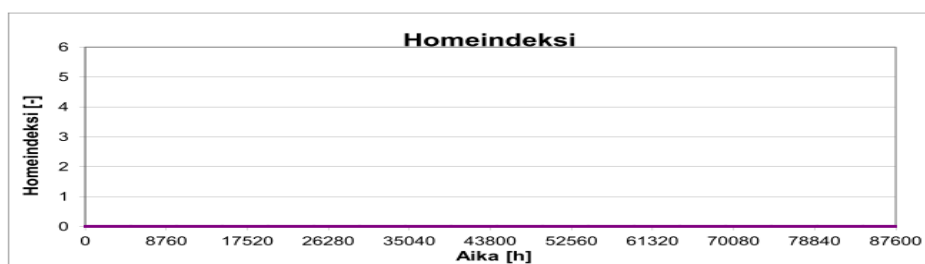
Kuvio 11. Liimakerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



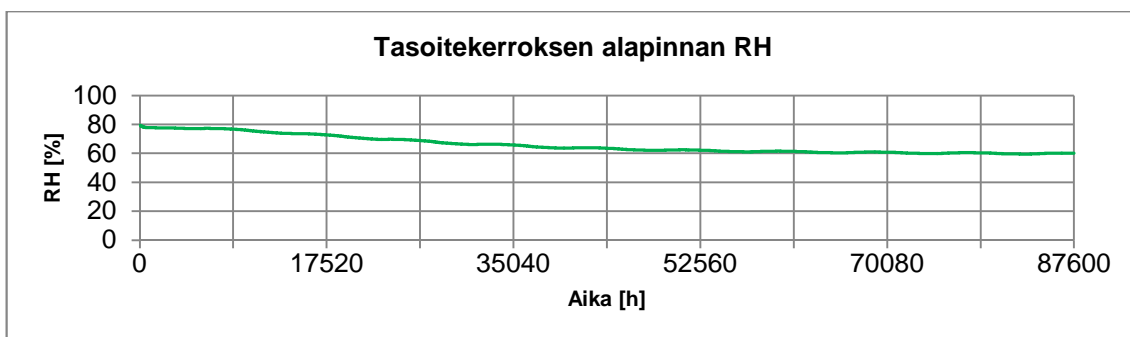
Kuvio 12. Liimakerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssuokat 3. Suurin homeindeksi 0.



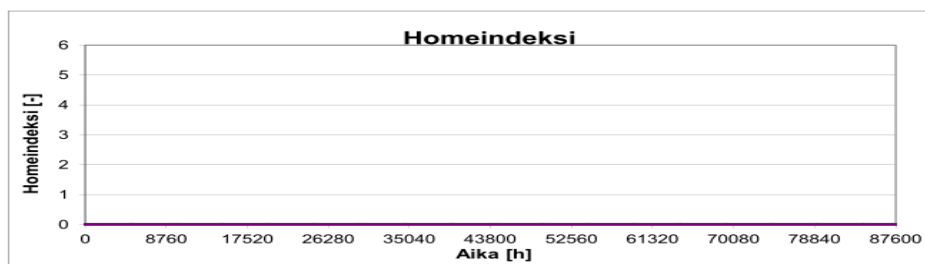
Kuvio 13. Tasoitekerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 14. Tasoitekerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0.

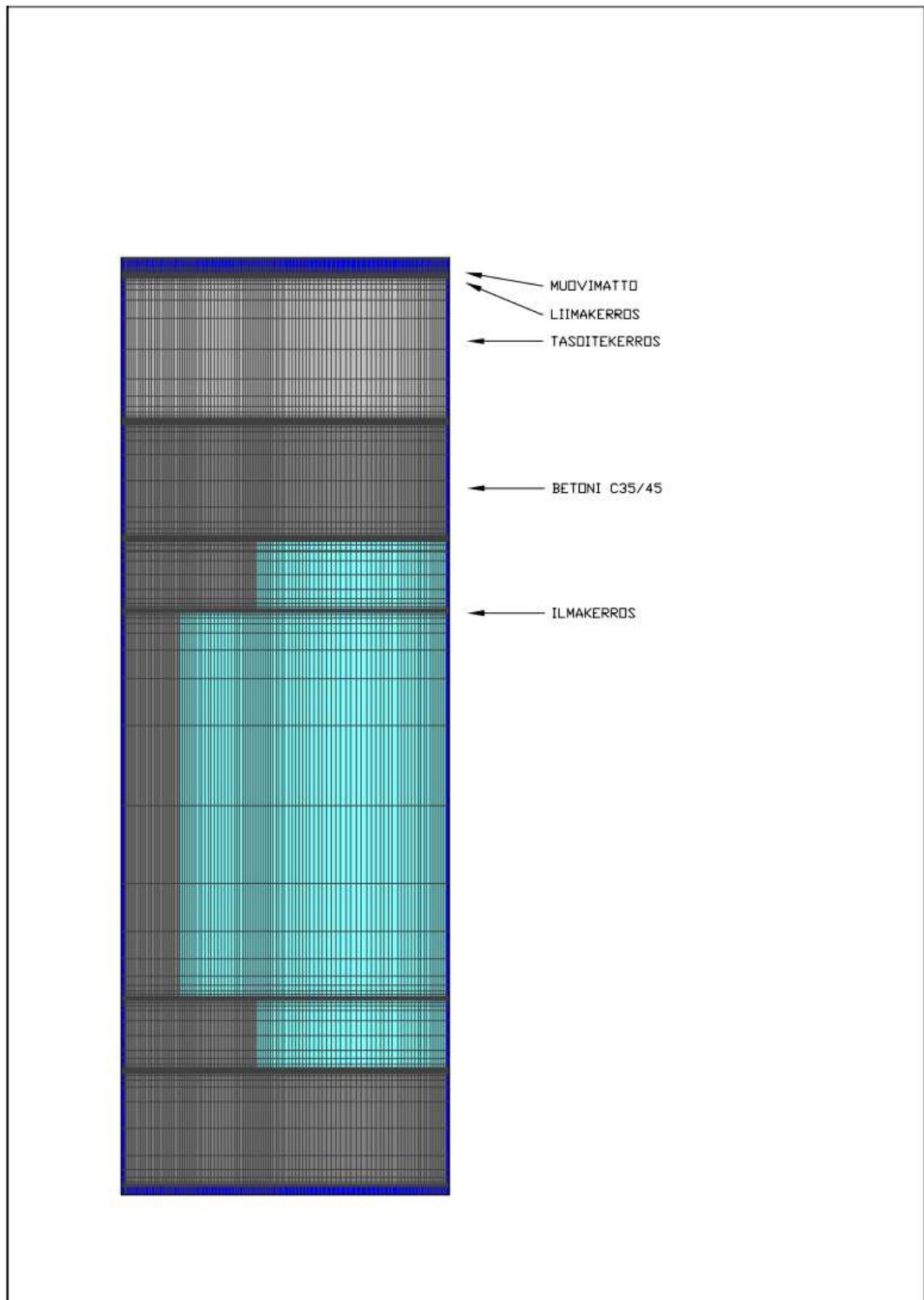


Kuvio 15. Tasoitekerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.

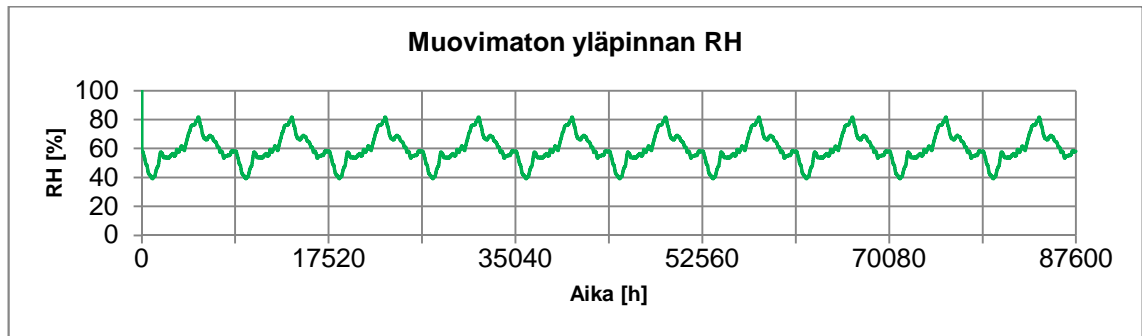


Kuvio 16. Tasoitekerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 4. Suurin homeindeksi 0.

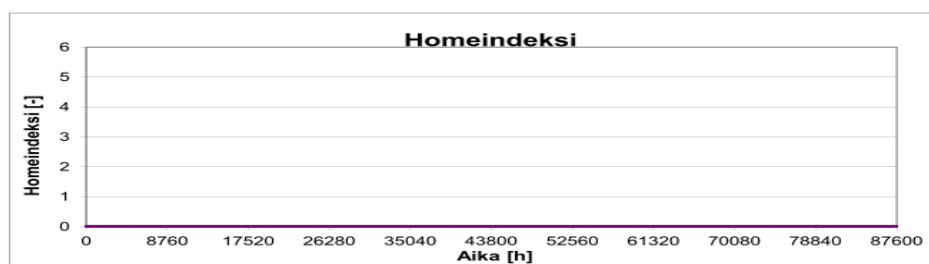
*Muovimatto*



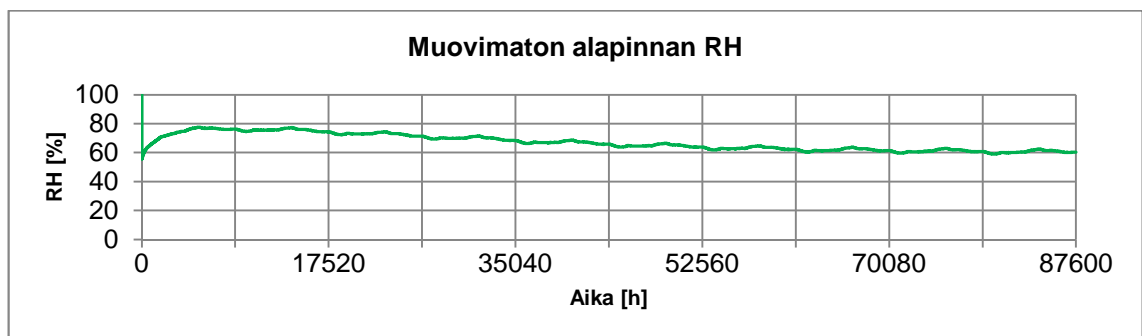
Kuva 2. Muovimatolla päällystetyn ontelolaattaväli­pohjan rakennemalli.



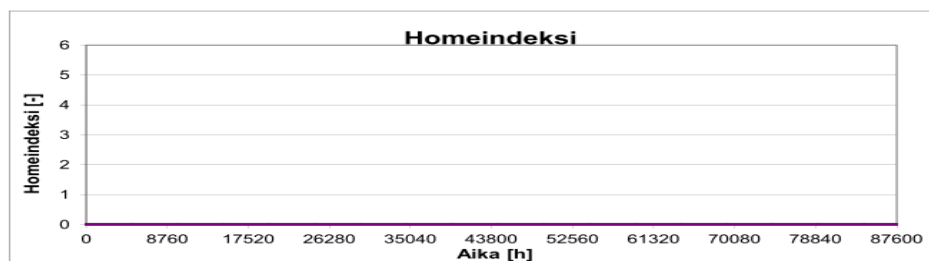
Kuvio 17. Muovimaton yläpinnan suhteellinen kosteus.



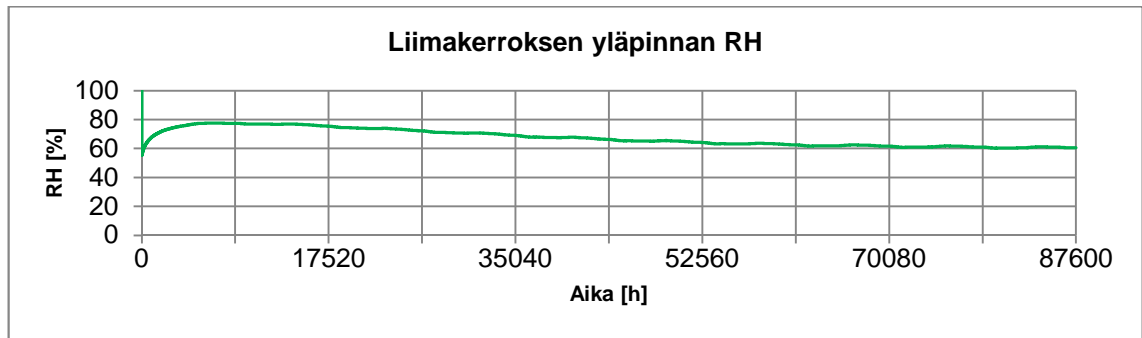
Kuvio 18. Muovimaton yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssuokat 3. Suurin homeindeksi 0.



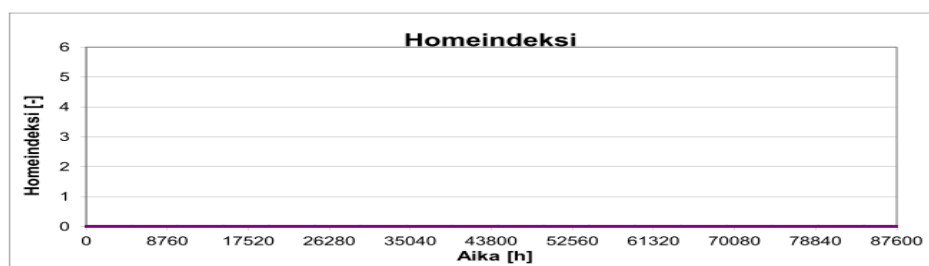
Kuvio 19. Muovimaton alapinnan suhteellinen kosteus.



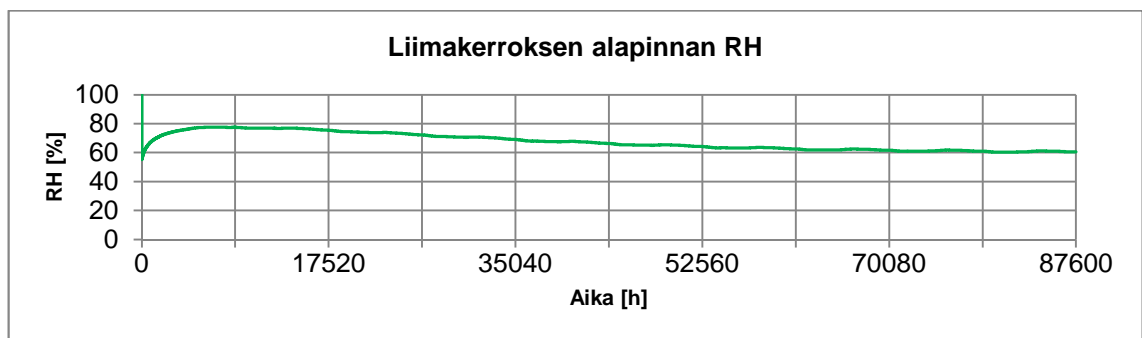
Kuvio 20. Muovimaton alapinnan homeindeksi. Herkkyyssuokat 3. Suurin homeindeksi 0.



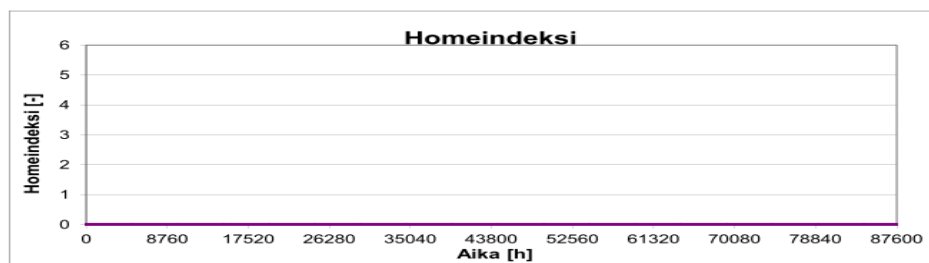
Kuvio 21. Liimakerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 22. Liimakerroksen yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0.

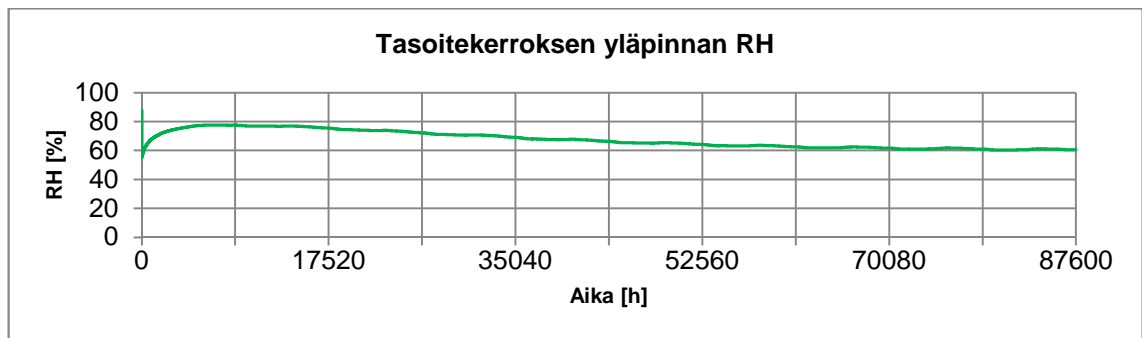


Kuvio 23. Liimakerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.

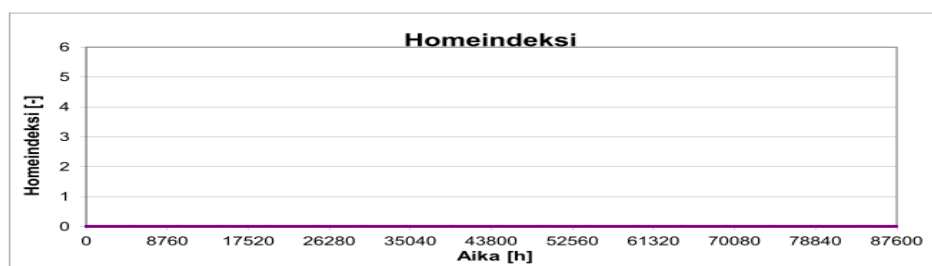


Kuvio 24. Liimakerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0.

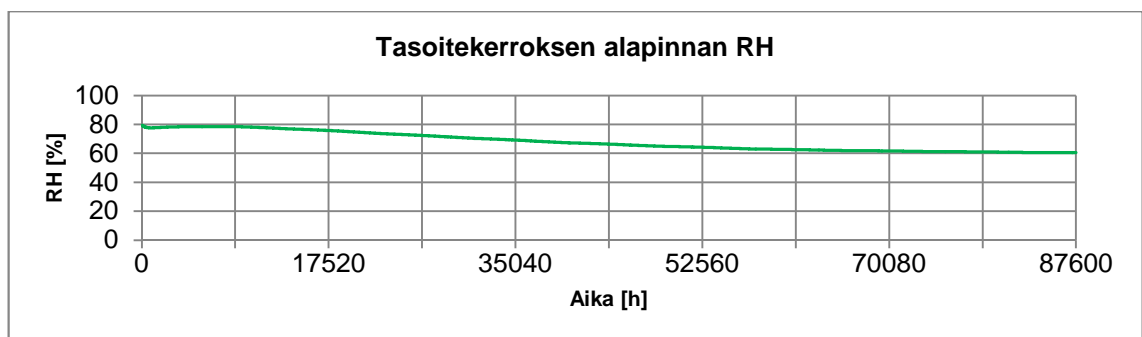




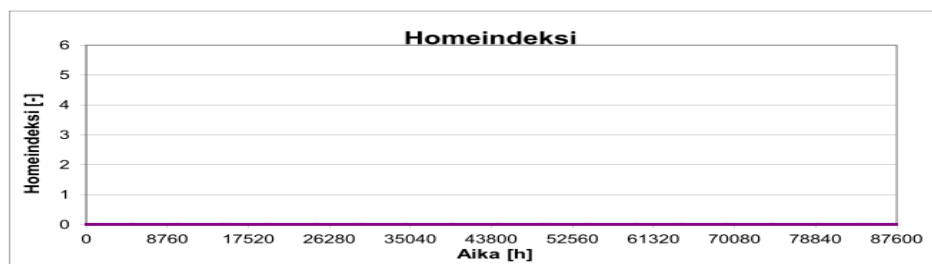
Kuvio 25. Tasoitekerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus



Kuvio 26. Tasoitekerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0.

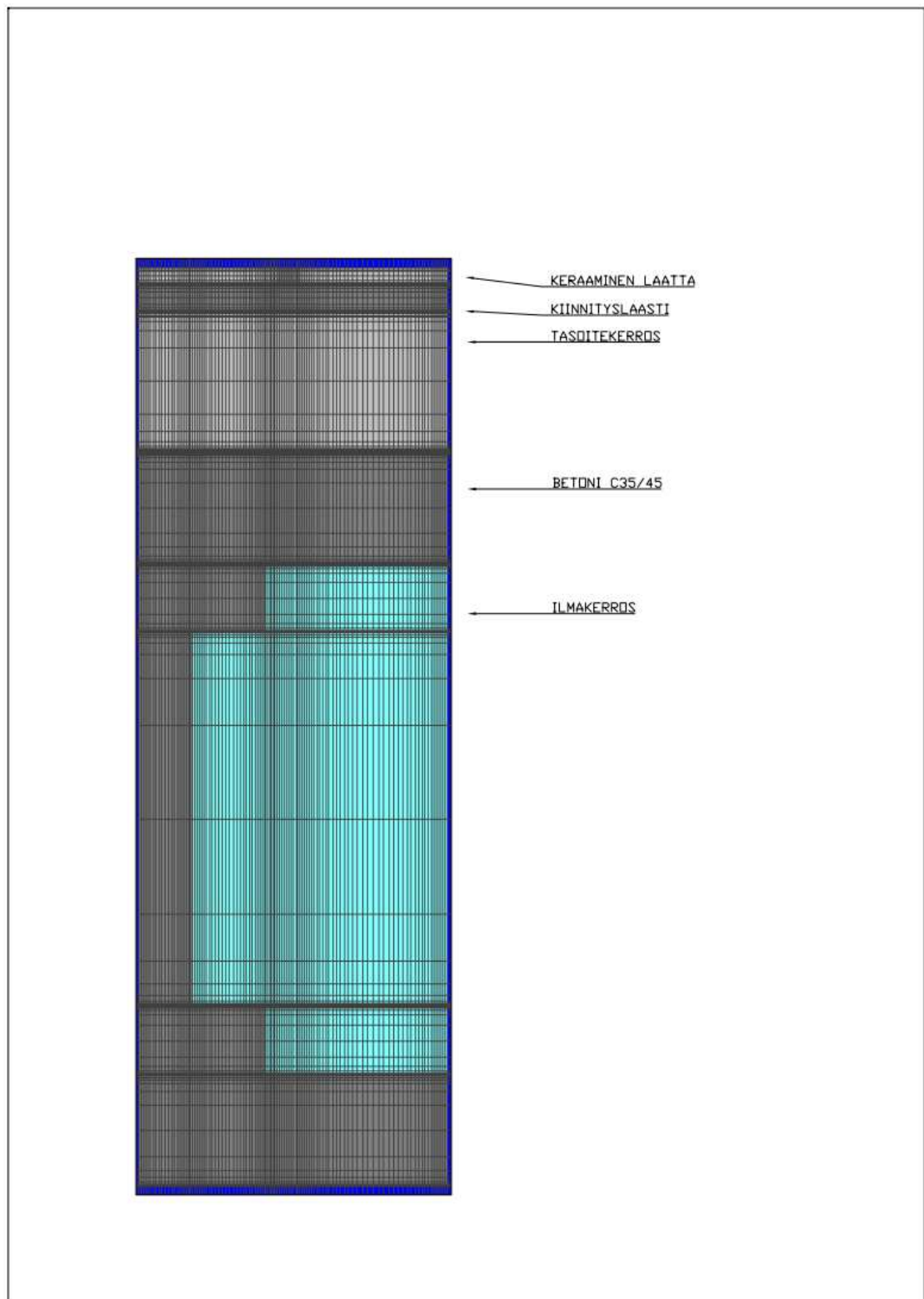


Kuvio 27. Tasoitekerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.

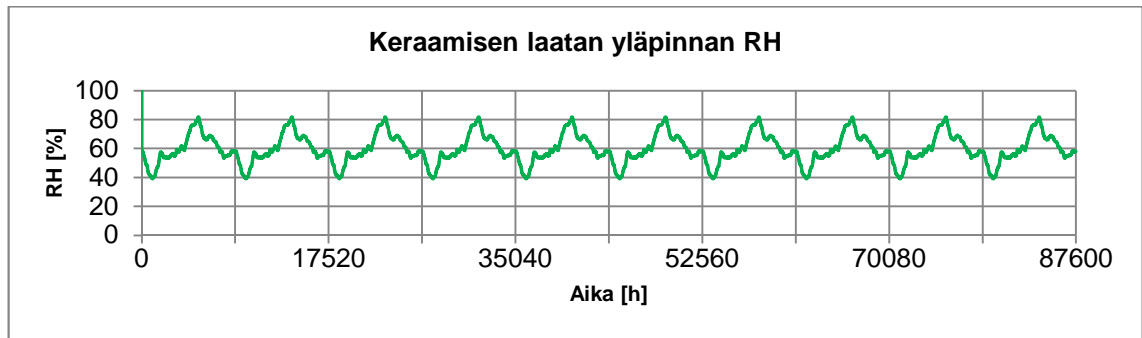


Kuvio 28. Tasoitekerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 4. Suurin homeindeksi 0.

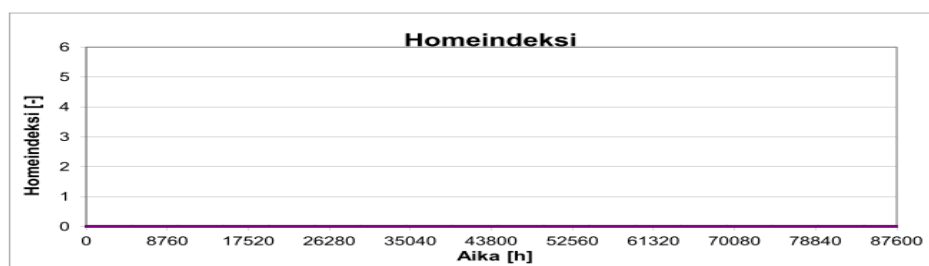
## Keraaminen laatta



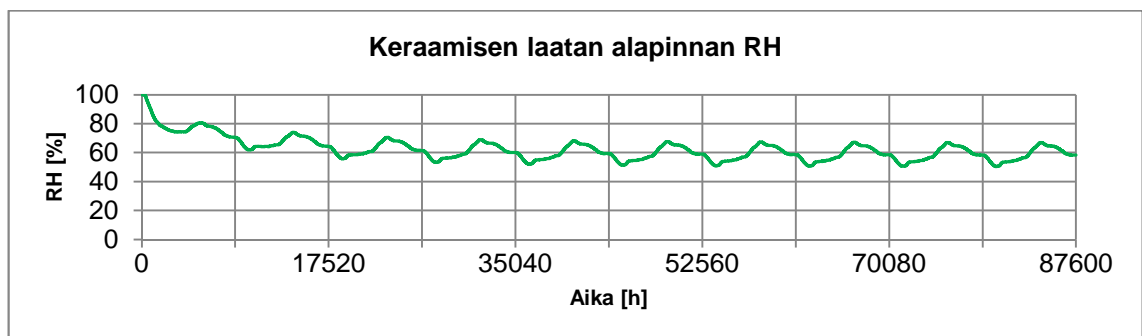
Kuva 3. Laatoitetun ontelolaattavälipohjan rakennemalli.



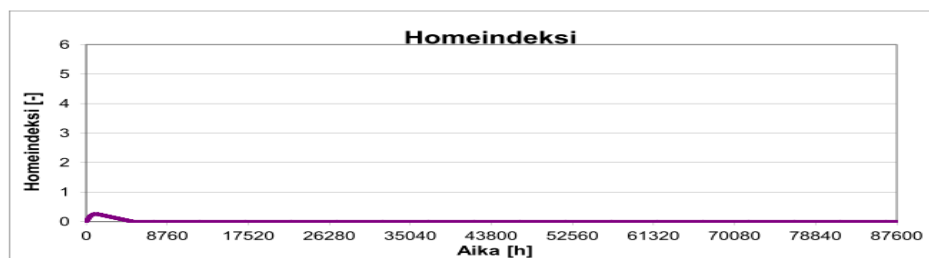
Kuvio 29. Keraamisen laatan yläpinnan suhteellinen kosteus.



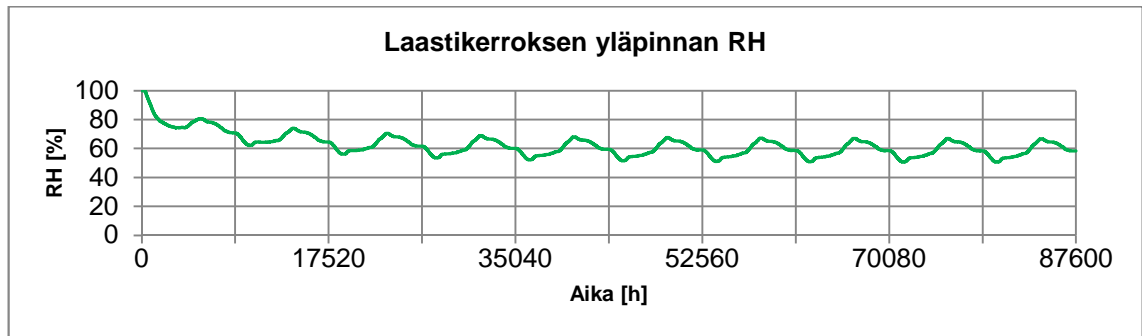
Kuvio 30. Keraamisen laatan yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0.



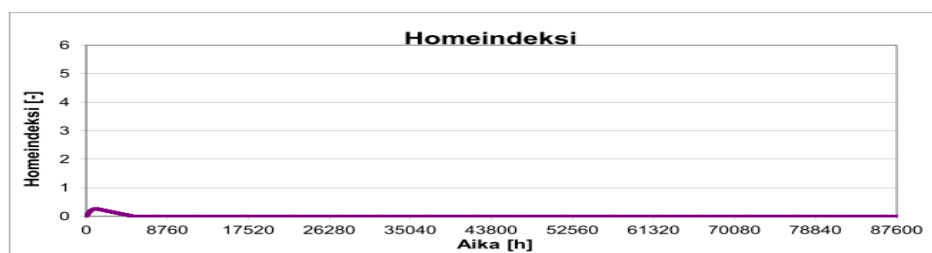
Kuvio 31. Keraamisen laatan alapinnan suhteellinen kosteus.



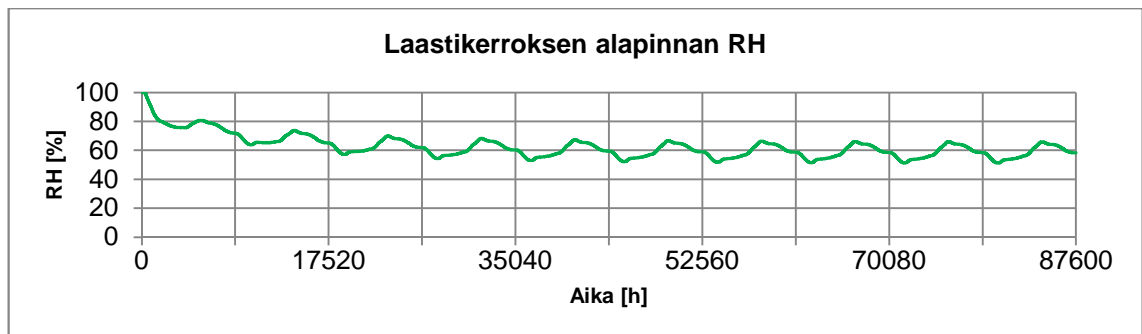
Kuvio 32. Keraamisen laatan alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,261 hetkellä 990...1123 h.



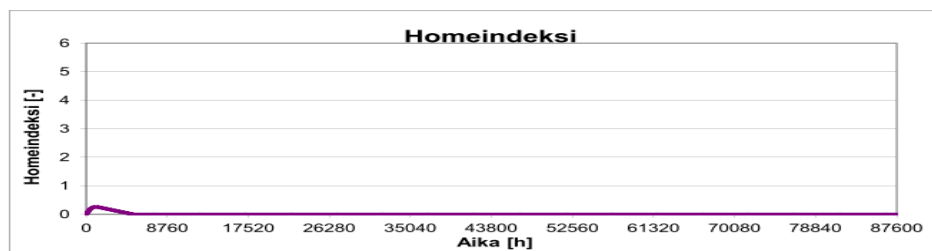
Kuvio 33. Laastikerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



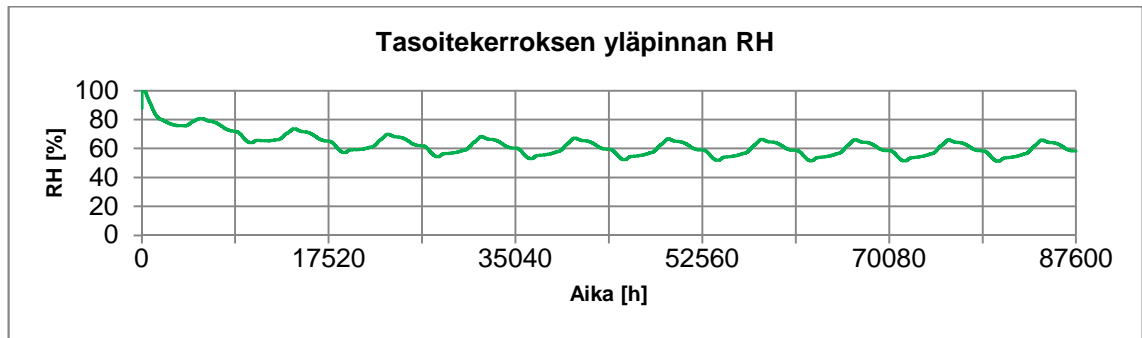
Kuvio 34. Laastikerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,262 hetkellä 965...1107 h.



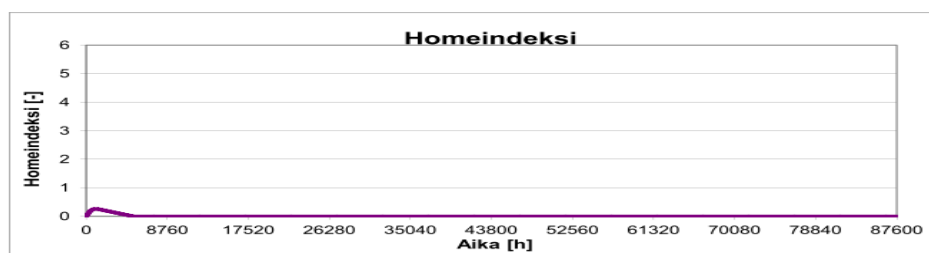
Kuvio 35. Laastikerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



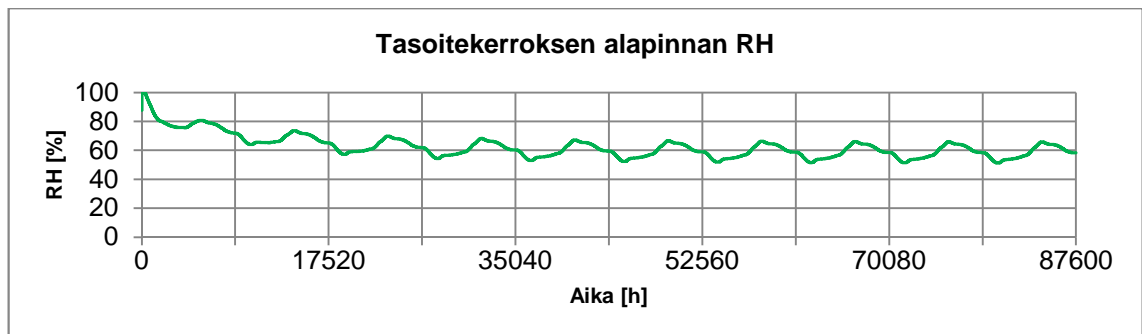
Kuvio 36. Laastikerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,272 hetkellä 1038...1170 h.



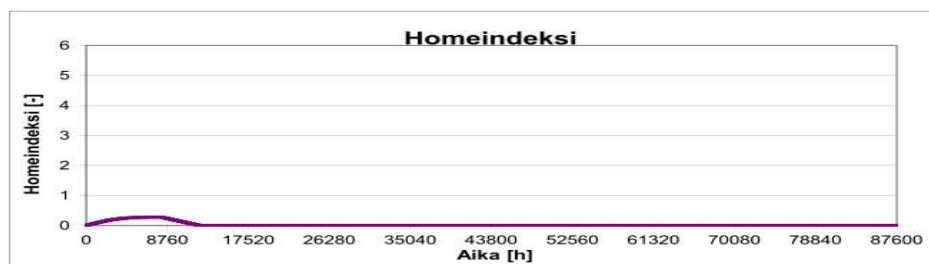
Kuvio 37. Tasoitekerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 38. Tasoitekerroksen yläpinnan homeindeksi. kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,261 hetkellä 1033...1174 h.



Kuvio 39. Tasoitekerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 40. Tasoitekerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 4. Suurin homeindeksi 0,274 hetkellä 6655...8151 h.

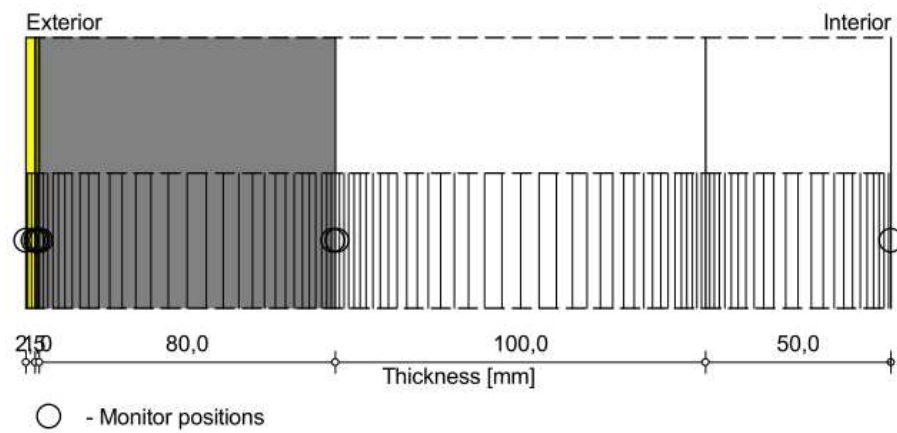
## **Maanvaraisen teräsbetonialapohjalaatan tulokset**

Tässä liitteessä esitetään maanvaraisen teräsbetonilaatan rakennemallit tarkastelupisteineen, RH- ja homeindeksikuvaajat. Tarkastelupisteinä on käytetty materiaalikerrosten ylä- ja alapintoja. Mallissa on tarkasteltu materiaalikerroksia, jotka ovat kosketuksissa pintamateriaalikerrosten kanssa.






Linoleumimattopinnoitteella ja käytetään herkkä-homehtumisluokkia. Linoleumin alustana olevan juuttikankaan arvioitiin kuuluvan hyvin herkkä -luokkaan. Mattopinnoitteella, pinnoiteliimalla, keraamisella laattalla ja sen kiinnitys- ja saumalaastilla käytetään kohtalaisen kestävä -luokkia. Betonilla käytetään kestävä-luokkia. Herkkyysluokat materiaaleille on valittu homemallin mukaan, pois lukien linoleumimatto ja sen liima. Näitä aineita ei tutkittu homemallihankkeessa. Näille aineille valittiin tapauskohtaisesti herkkyysluokka esimerkkimateriaalien mukaan.

Betonilattian päällystämisen jälkeen maapohjan lämpötilaa kuvattiin sinikäyrällä, jonka vaihteluväli oli 15...16 °C. Tämä ei juuri vaikuta tarkasteltavien materiaalien lämpötilaan, joten lämpötilakuvaajia ei esitetä.

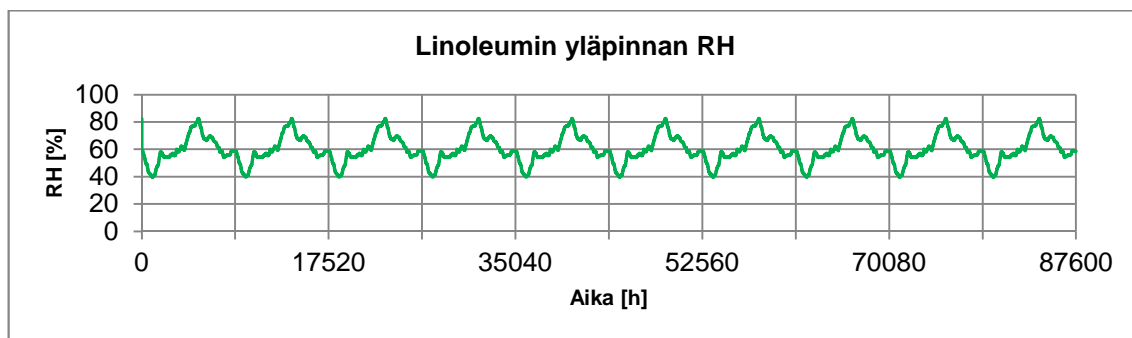
### *Linoleumipinnoite*



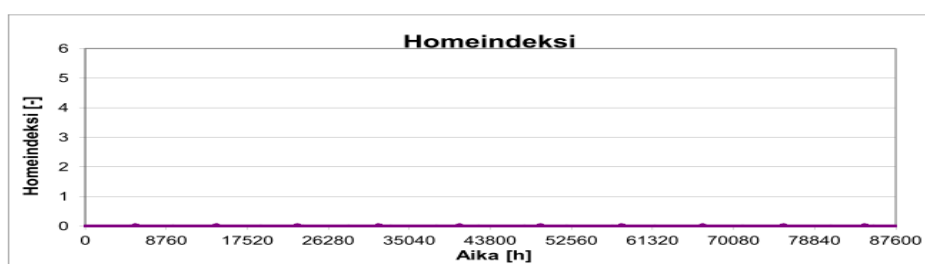
#### **Materials :**

-  - \*Linoleum UPOFLOOR
-  - \*CascoProff Solid -Liima
-  - \*Concrete, C35/45
-  - \*XPS-1 ylä
-  - \*XPS-1 ala

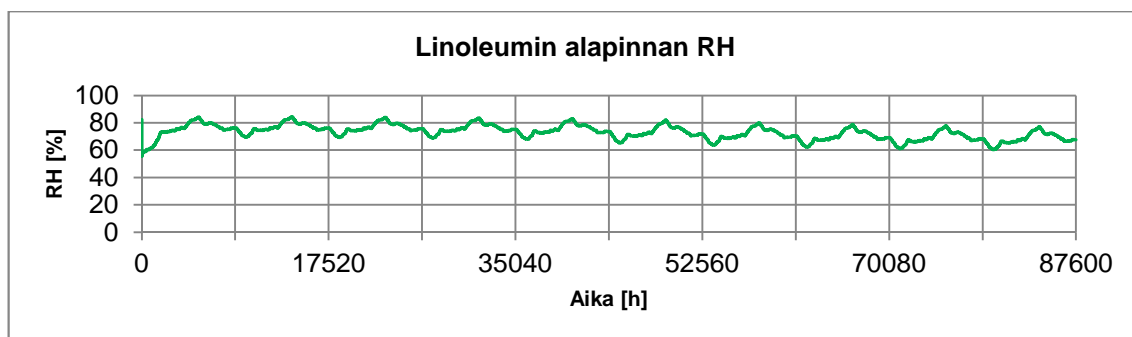
Kuva 1. Linoleumilla päällystetyn maanvaraisen teräsbetonilaatan rakennemalli.



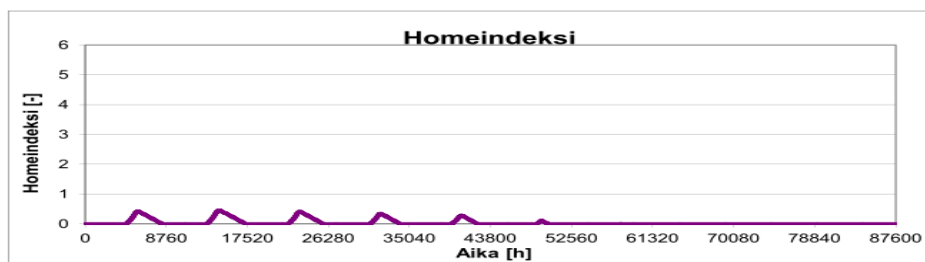
Kuvio 1. Linoleumin yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 2. Linoleumin yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 2. Suurin homeindeksi 0,037 hetkellä 5408...5419 h.

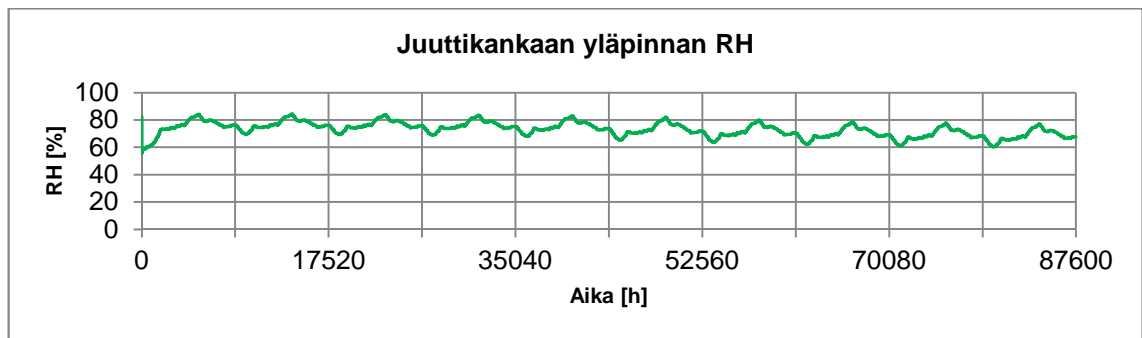


Kuvio 3. Linoleumin alapinnan suhteellinen kosteus.

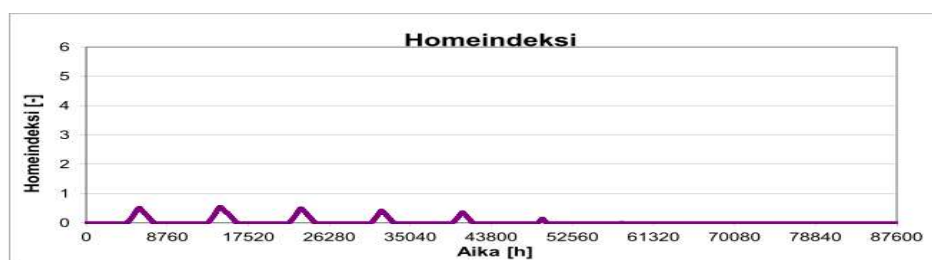


Kuvio 4. Linoleumin alapinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 1, maksimimääräluokka 2. Suurin homeindeksi 0,455 hetkellä 14416...14506 h.

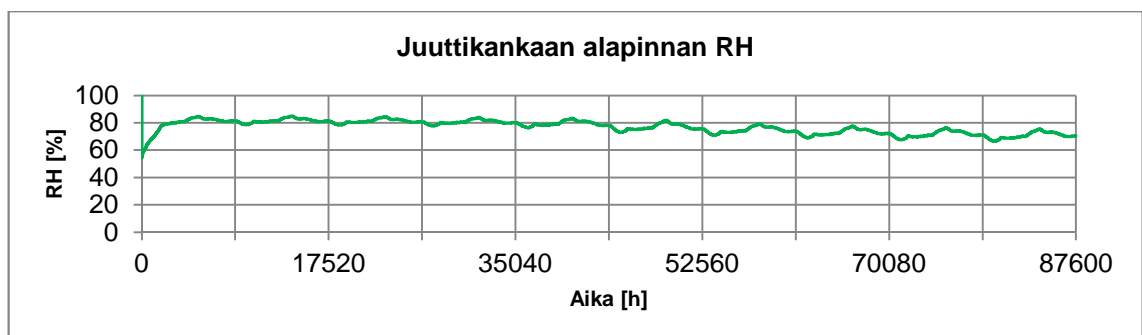




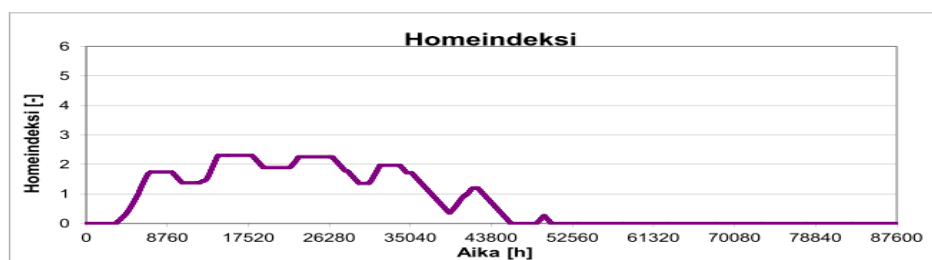
Kuvio 5. Juuttikankaan yläpinnan suhteellinen kosteus.



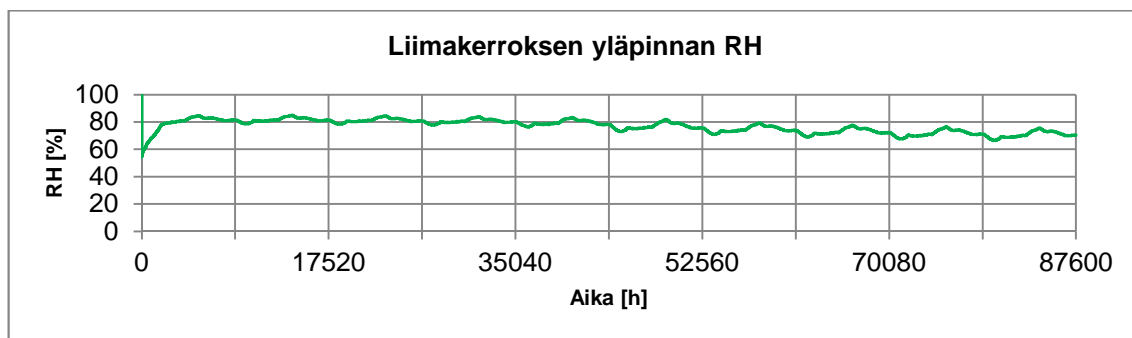
Kuvio 6. Juuttikankaan yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 1. Suurin homeindeksi 0,55 hetkellä 14499...14504 h.



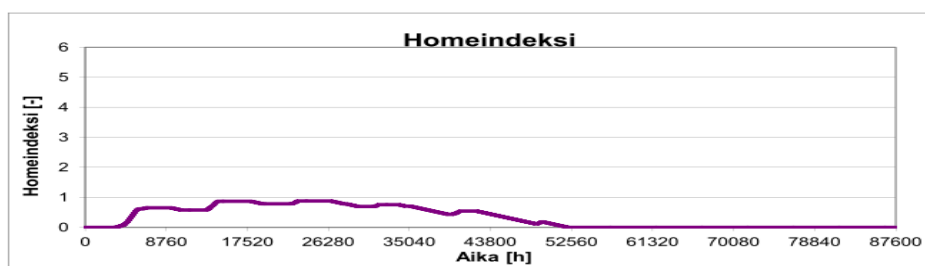
Kuvio 7. Juuttikankaan alapinnan suhteellinen kosteus.



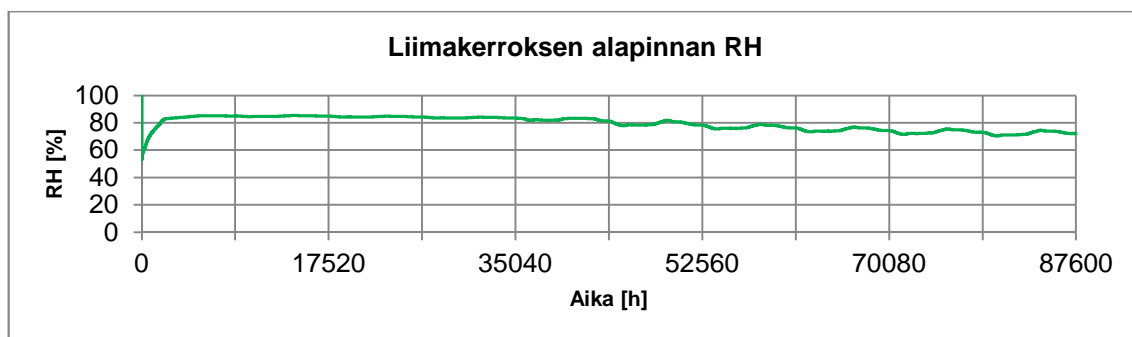
Kuvio 8. Juuttikankaan alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 1. Suurin homeindeksi 2,306 hetkellä 14320...17905 h.



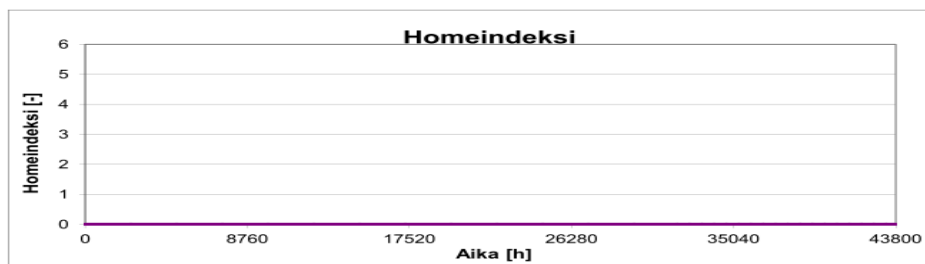
Kuvio 9. Liimakerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



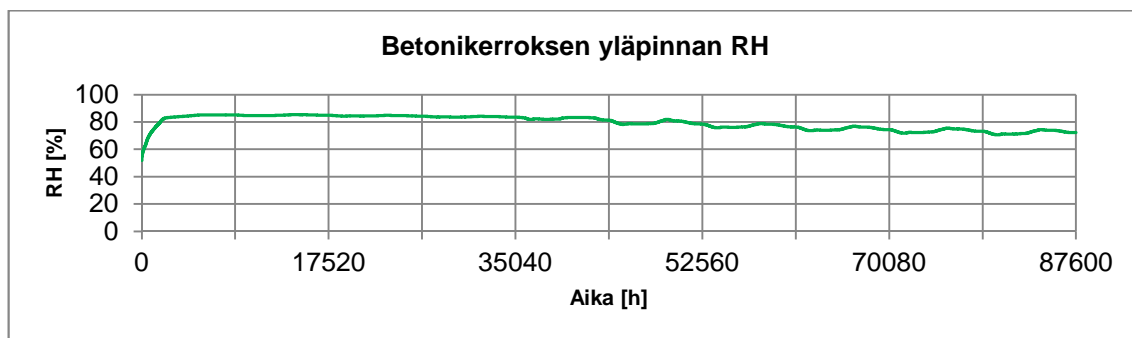
Kuvio 10. Liimakerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 1, maksimimääräluokka 3. Suurin homeindeksi 0,876 hetkellä 23000...26563 h.



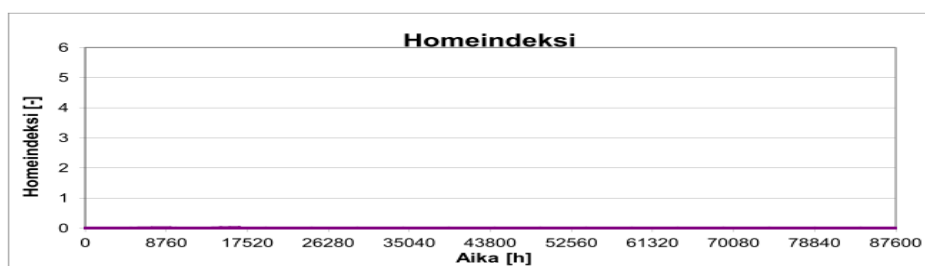
Kuvio 11. Liimakerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



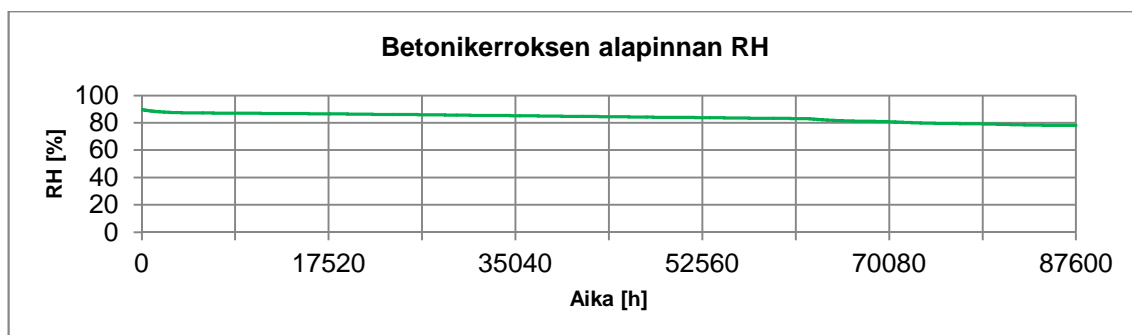
Kuvio 12. Liimakerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssuokat 3. Suurin homeindeksi 0.



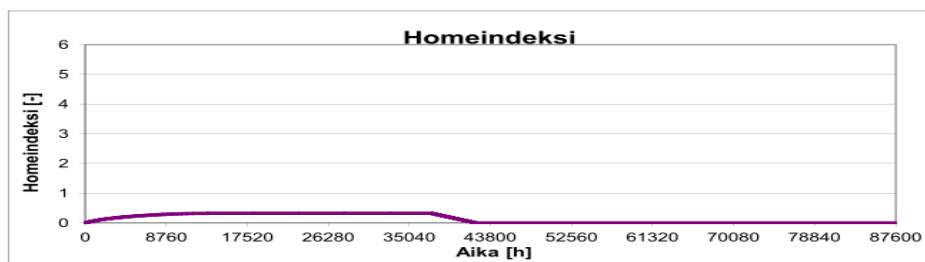
Kuvio 13. Betonikerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 14. Betonikerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4.. Suurin homeindeksi 0,012 hetkellä 15873-16526 h.

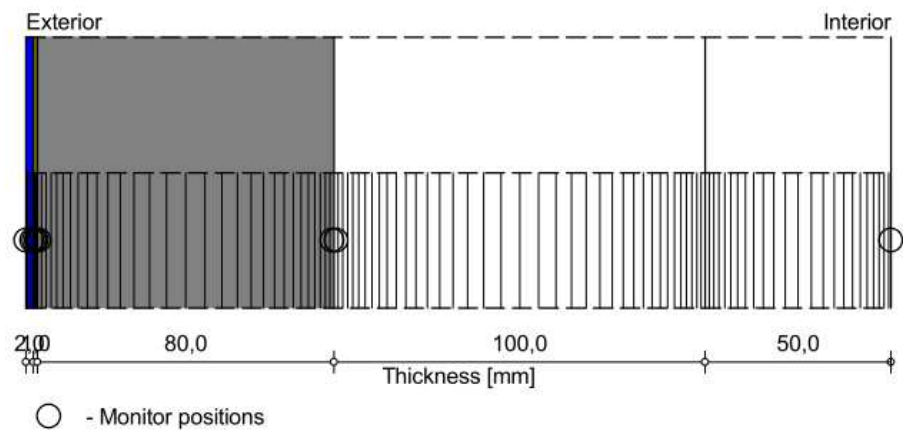


Kuvio 15. Betonikerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.








Kuvio 16. Betonikerroksen alapinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,324 hetkellä 14426...37390 h.

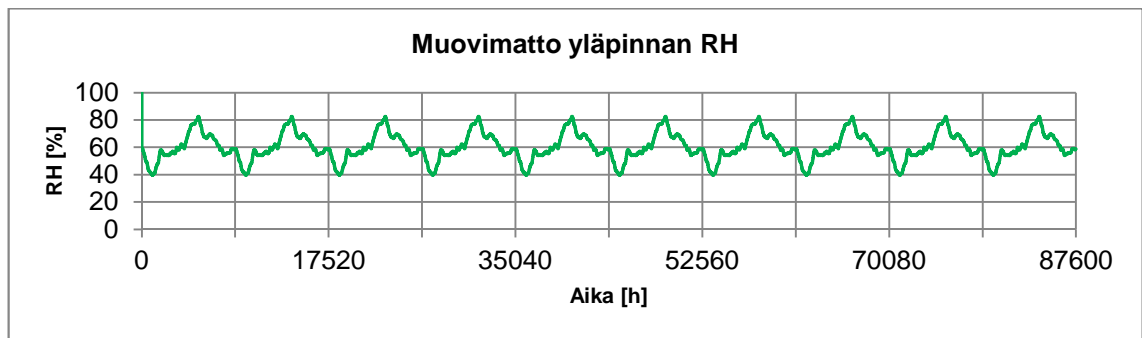
### Muovimatto



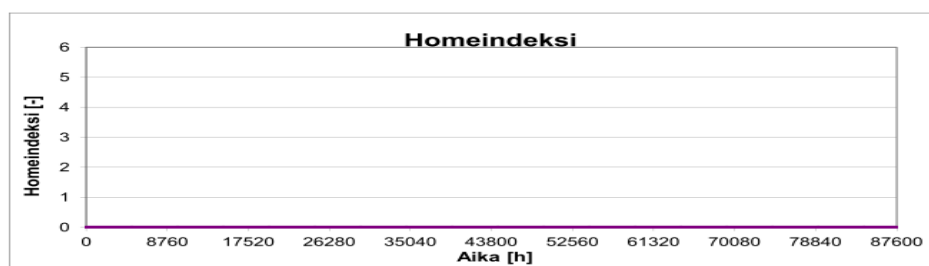
#### Materials :

-  - \*Estrad-muovimatto
-  - \*CascoProff Solid -Liima (Copy)
-  - \*Concrete, C35/45
-  - \*XPS-1 ylä
-  - \*XPS-1 ala

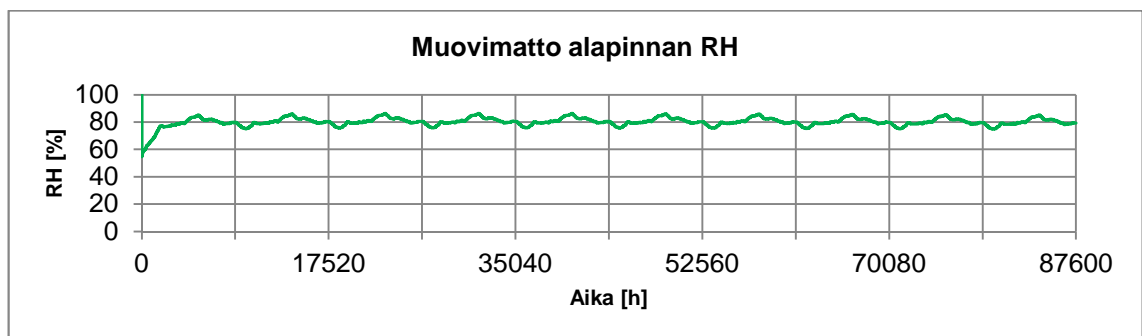
Kuva 2. Muovimatolla päällystetyn maanvaraisen teräsbetoni- ja XPS-eristysrakennemalli.



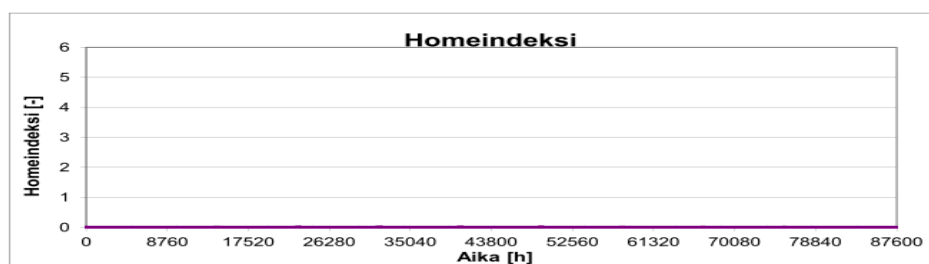
Kuvio 17. Muovimaton yläpinnan suhteellinen kosteus.



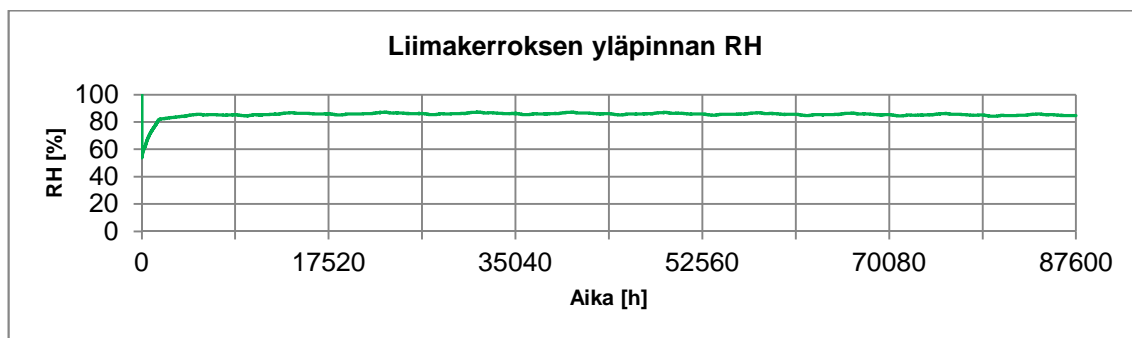
Kuvio 18. Muovimaton yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0.



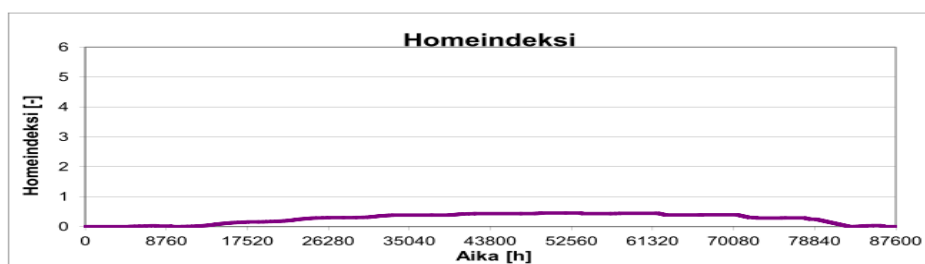
Kuvio 19. Muovimaton alapinnan suhteellinen kosteus.



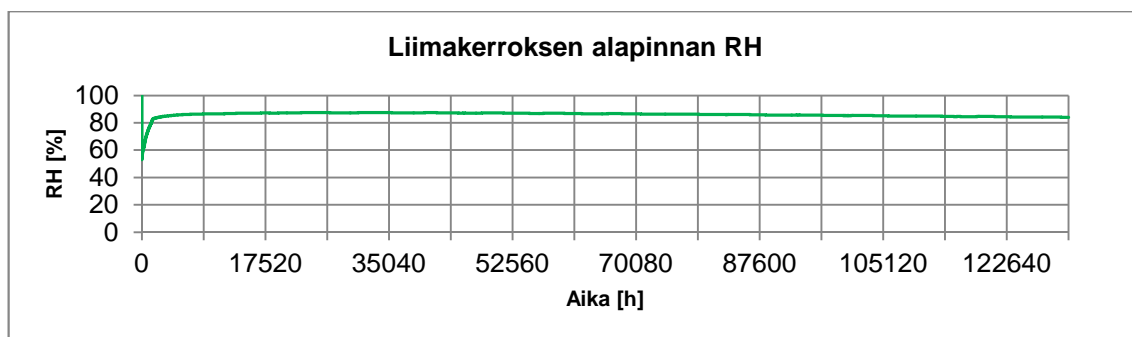
Kuvio 20. Muovimaton alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,01 hetkellä 31709...31766 h.



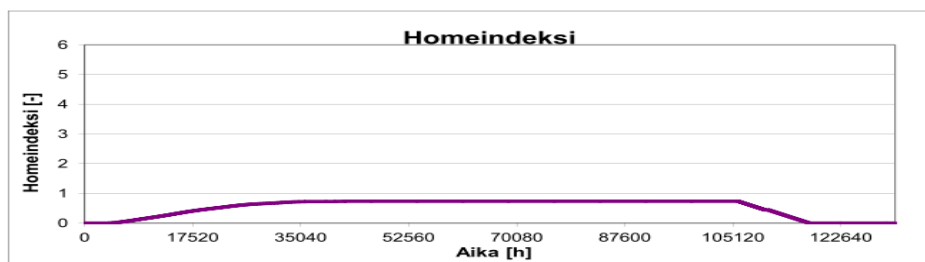
Kuvio 21. Liimakerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



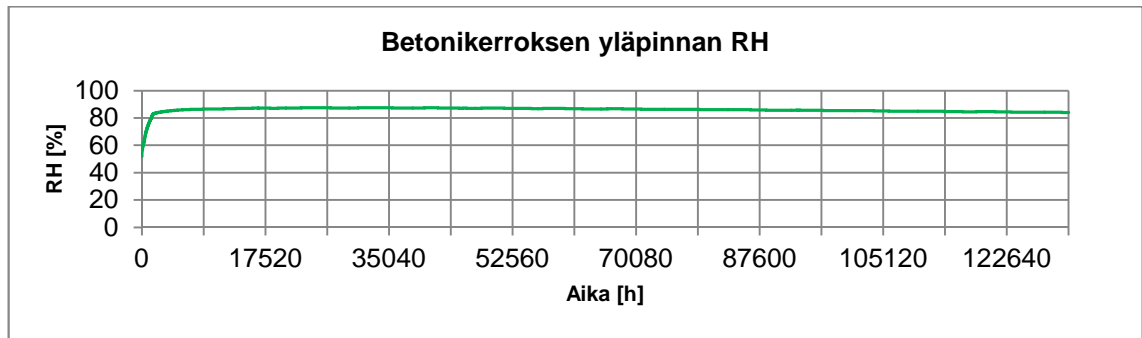
Kuvio 22. Liimakerroksen yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,453 hetkellä 50397...53478 h.



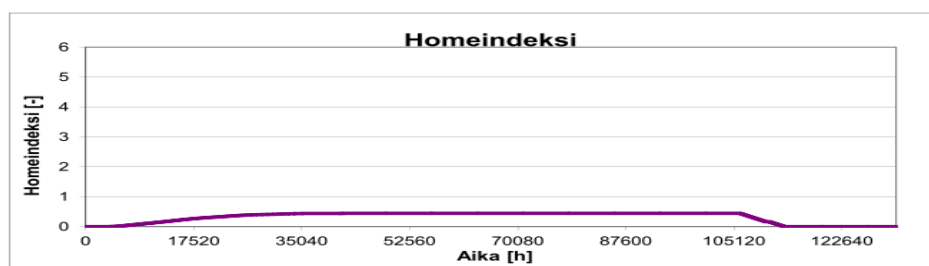
Kuvio 23. Liimakerroksen alapinnan suhteellinen kosteus. Tarkastelu aika 15 vuotta.



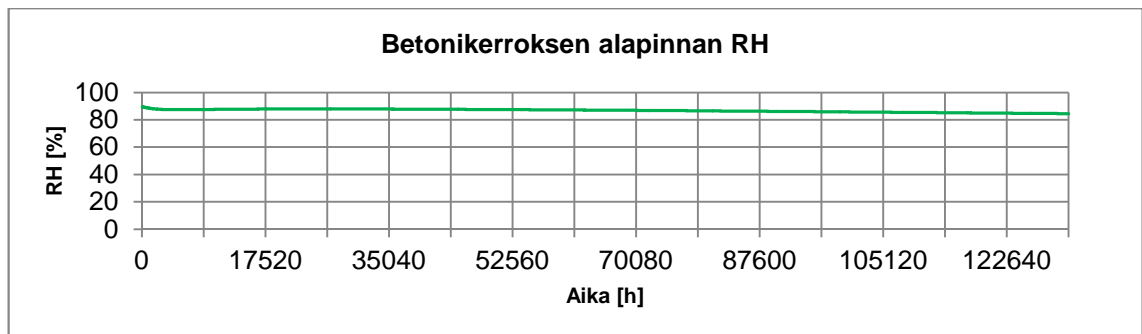
Kuvio 24. Liimakerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Tarkastelu aika 15 vuotta. Suurin homeindeksi 0,733 hetkellä 42093...106006 h.



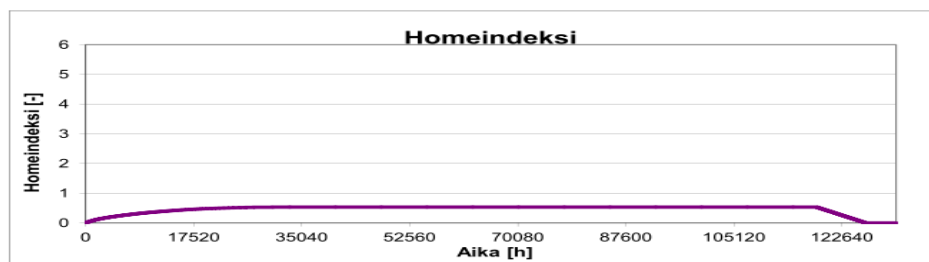
Kuvio 25. Betonikerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus. Tarkastelu-aika 15 vuotta.



Kuvio 26. Betonikerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,441 hetkellä 41566...106112 h.

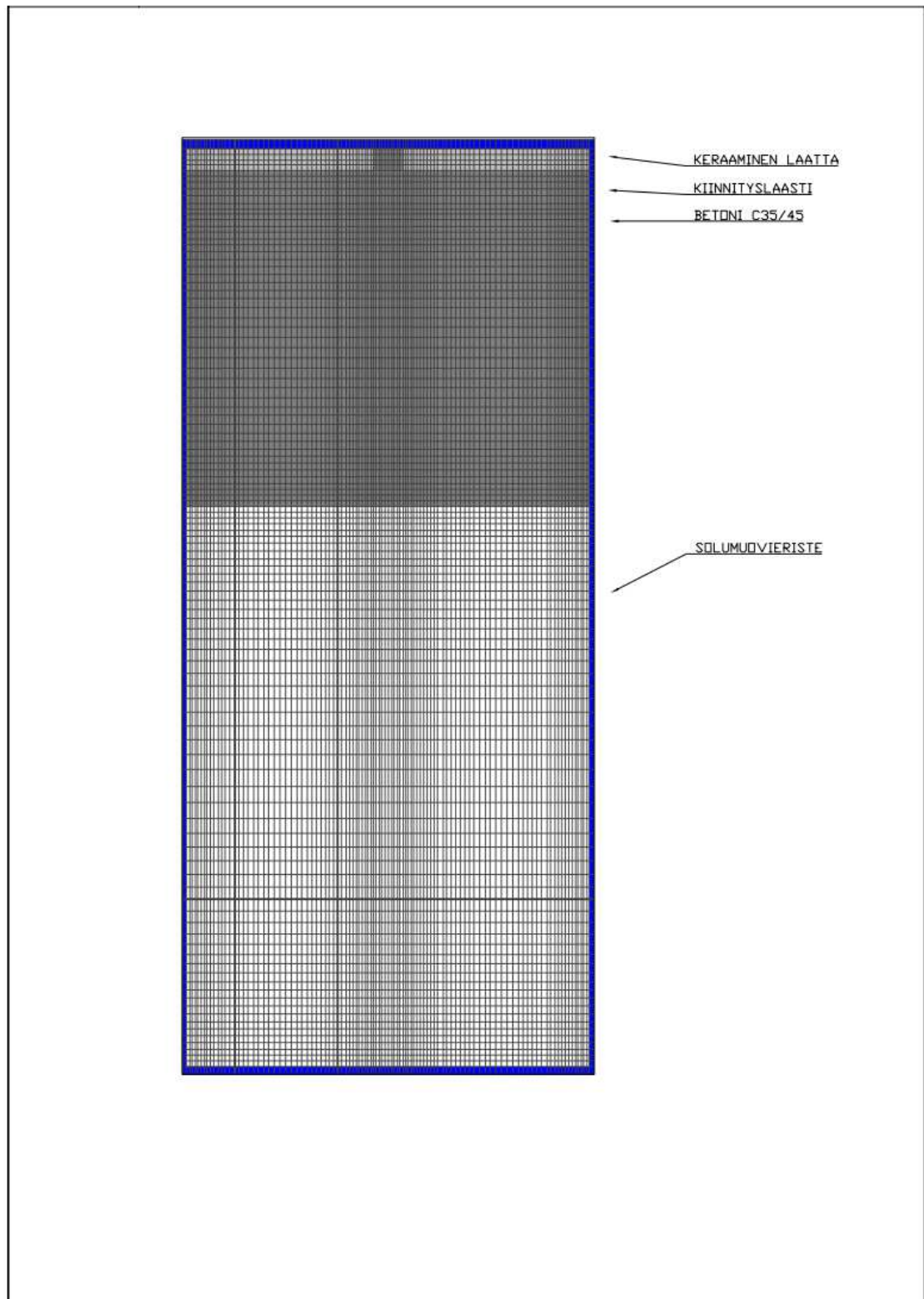


Kuvio 27. Betonikerroksen alapinnan suhteellinen kosteus. Tarkastelu-aika 15 vuotta.



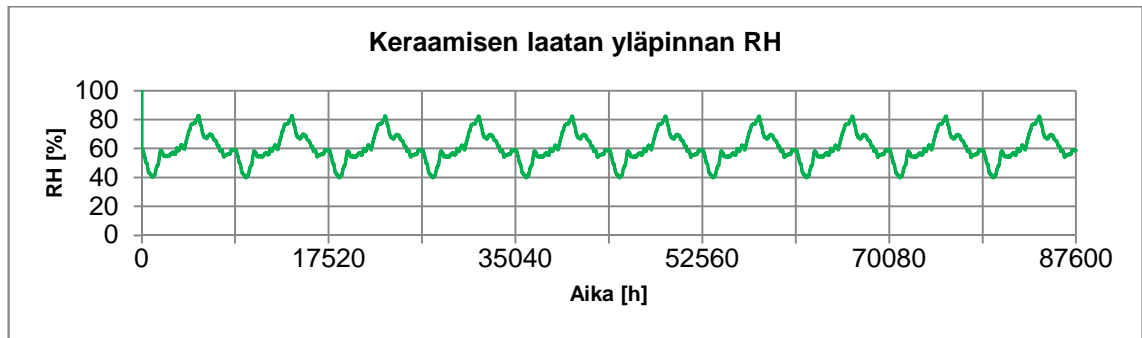
Kuvio 28. Betonikerroksen alapinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,535 hetkellä 34664...118507 h.

*Keraaminen laatta*

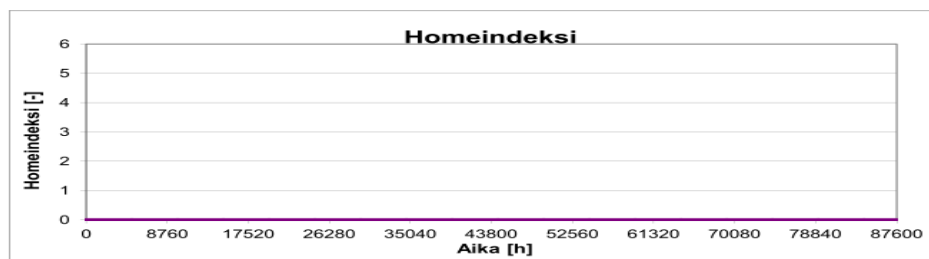


Kuva 3. Laatoitetun alapohjateräsbetoni-laatan rakennemalli.

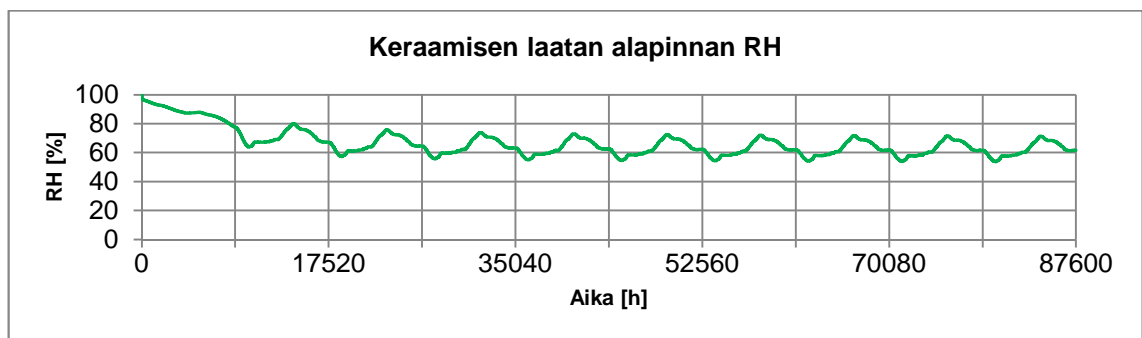




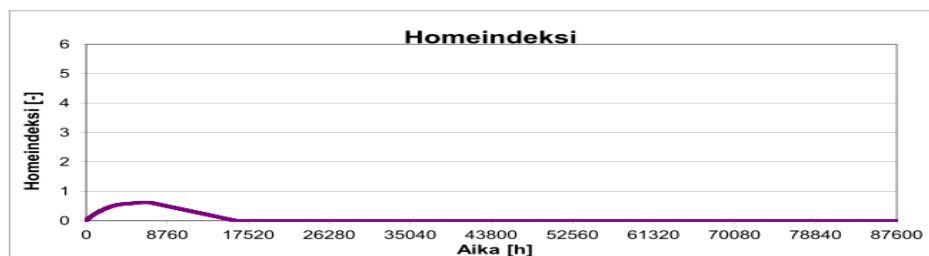
Kuvio 29. Keraamisen laatan yläpinnan suhteellinen kosteus.



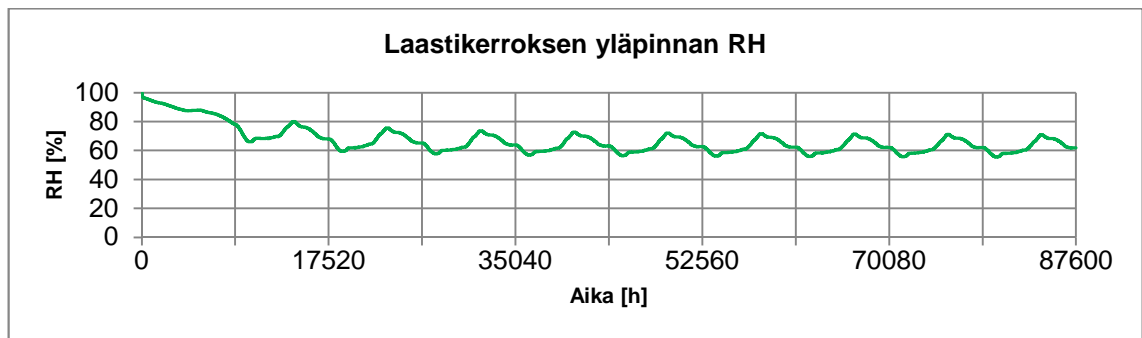
Kuvio 30. Keraamisen laatan yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0.



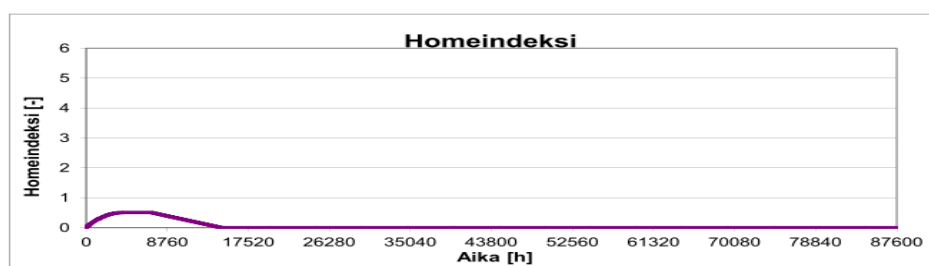
Kuvio 31. Keraamisen laatan alapinnan suhteellinen kosteus.



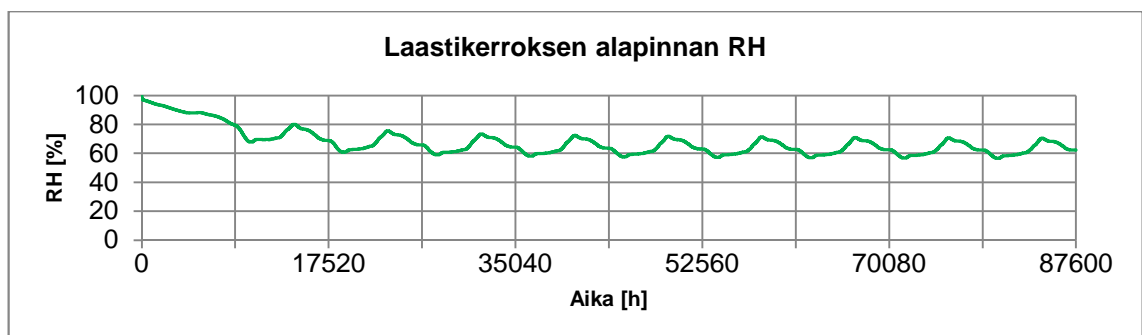
Kuvio 32. Keraamisen laatan alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,614 hetkellä 5738...6924 h.



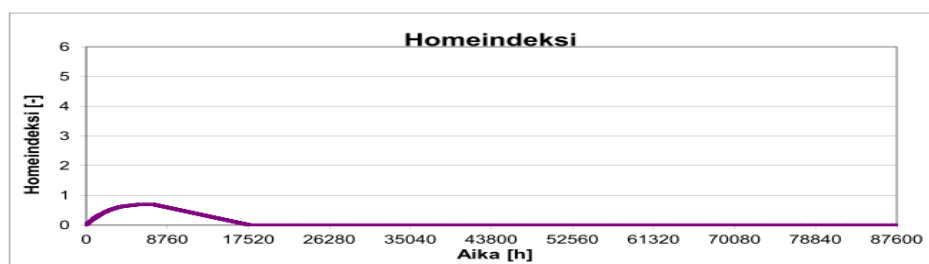
Kuvio 33. Laastikerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



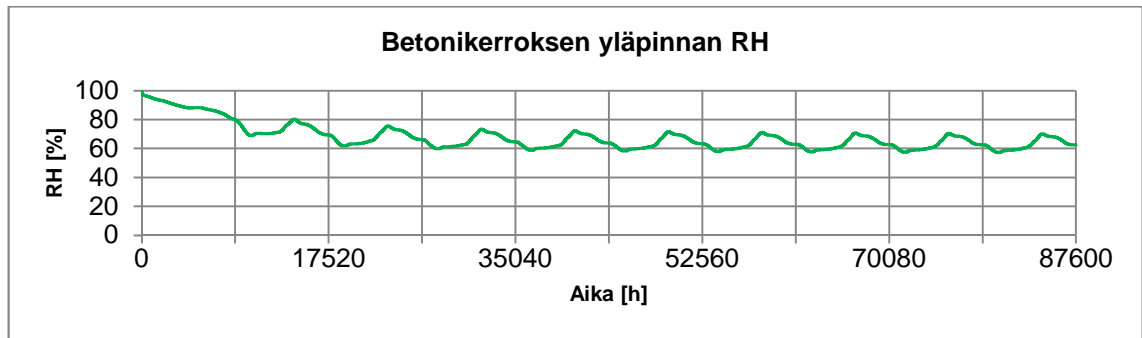
Kuvio 34. Laastikerroksen yläpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,633 hetkellä 5575...7007 h.



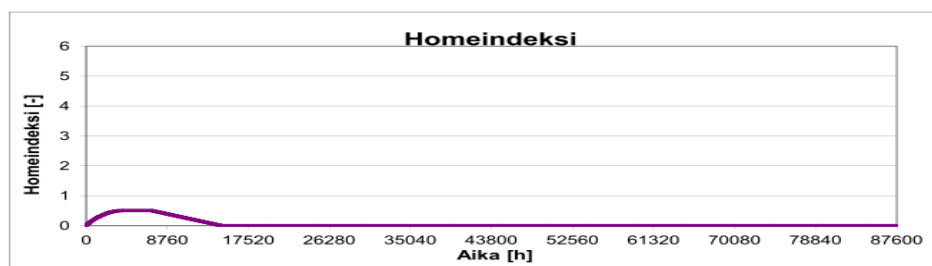
Kuvio 35. Laastikerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



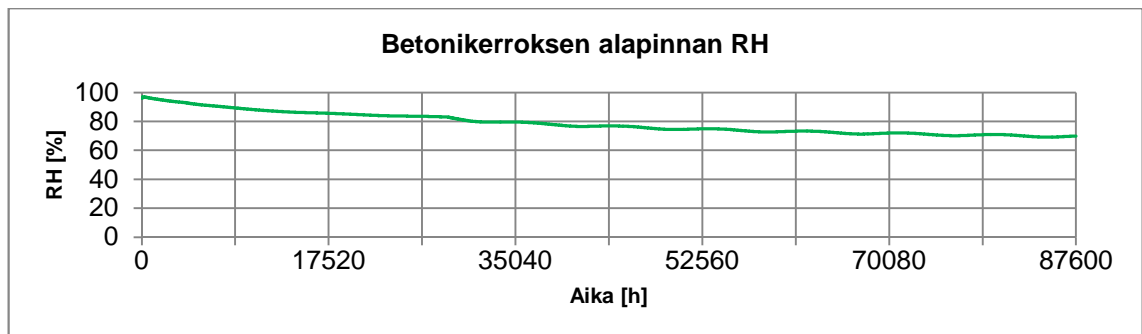
Kuvio 36. Laastikerroksen alapinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,697 hetkellä 6090...7224 h.



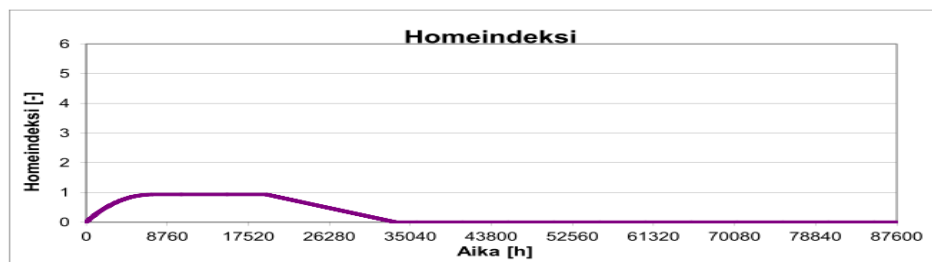
Kuvio 37. Betonikerroksen yläpinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 38. Betonikerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,565 hetkellä 6120...7323 h.



Kuvio 39. Betonikerroksen alapinnan suhteellinen kosteus.



Kuvio 40. Betonikerroksen yläpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,931 hetkellä 7108...19468 h.

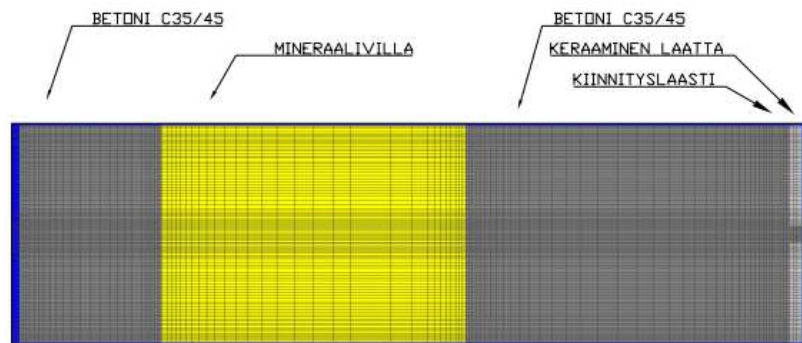
## **Betonisandwich-seinän tulokset**

Tässä liitteessä esitetään betonisandwich-seinän rakennemallit tarkastelupisteineen, RH- ja lämpökuvaajat sekä homeindeksikuvaajat. Rakenteen ulkopinta on alttiina saateelle. Tarkastelupisteinä on käytetty materiaalikerrosten sisä- ja ulkopintoja sekä mineraalivillan keskiosaa.

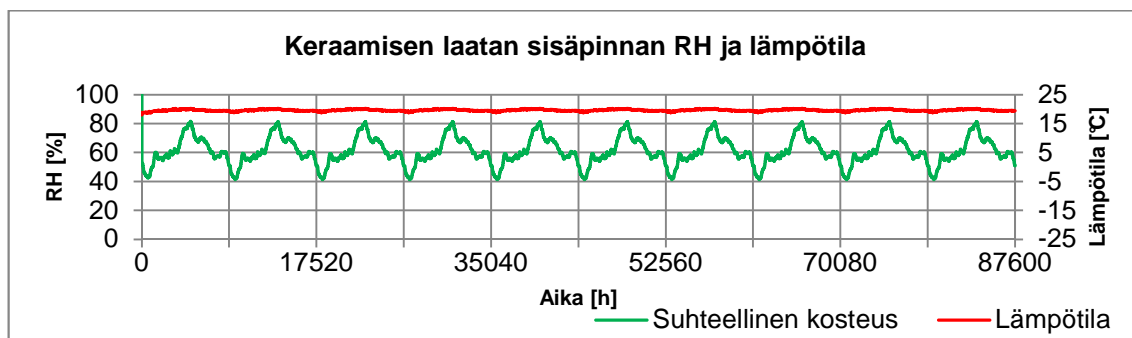
Linoleumimattopinnoitteella ja käytetään herkkä-homehtumisluokkia. Linoleumin alustana olevan juuttikankaan arvioitiin kuuluvan hyvin herkkä -luokkaan. Mattopinnoitteella, pinnoiteliimalla, keraamisella laattalla ja sen kiinnitys- ja saumaustaastilla käytetään kohtalaisen kestävä -luokkia. Betonilla käytetään kestävä-luokkia. Herkkyysluokat materiaaleille on valittu homemallin mukaan, pois lukien linoleumimatto ja sen liima. Näitä aineita ei tutkittu homemallihankkeessa. Näille aineille valittiin tapauskohtaisesti herkkyysluokka esimerkkimateriaalien mukaan.

Maalipinnan tapauksessa koko rakenteen suhteellinen kosteus oli 100 % pinnoitusheikellä. Maalipinnan  $s_d$ -arvo oli 2 m.

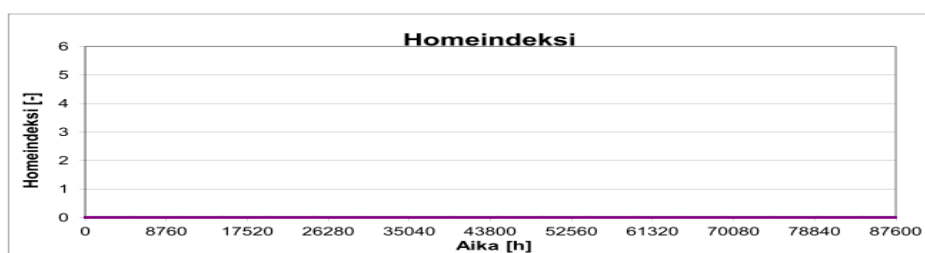
*Keraaminen laatta, mineraalivilla*



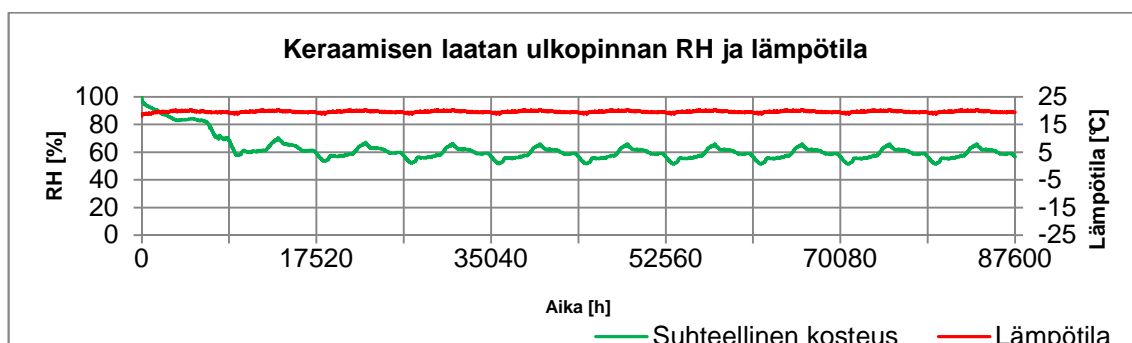
Kuva 1. Laatoitetun sandwichelementtiseinän rakennemalli.



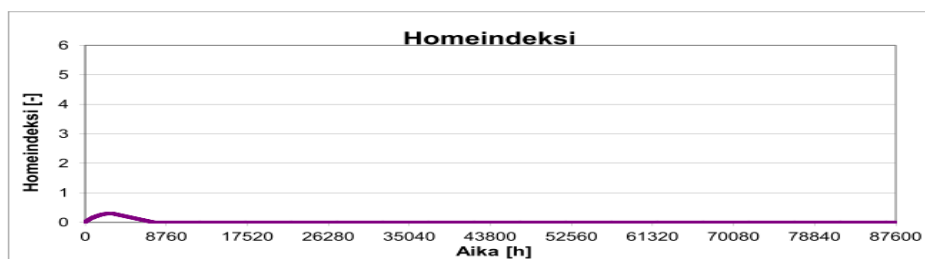
Kuvio 1. Keraamisen laatan sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



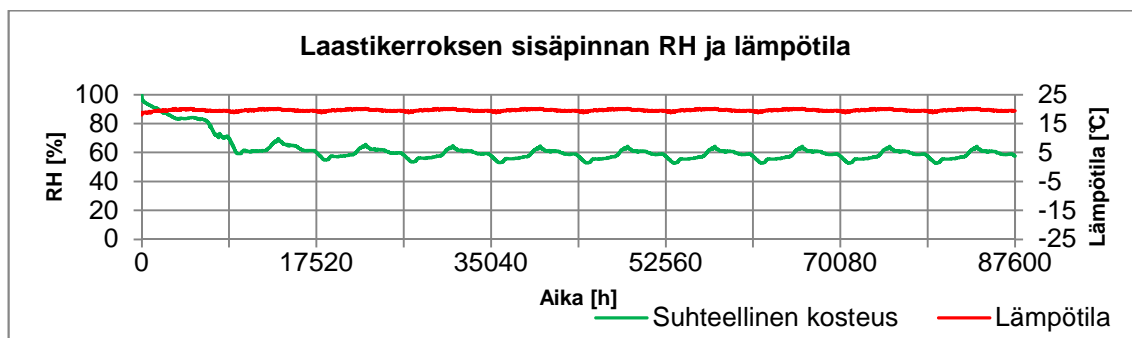
Kuvio 2. Keraamisen laatan sisäpinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 3. Suurin homeindeksi 0.



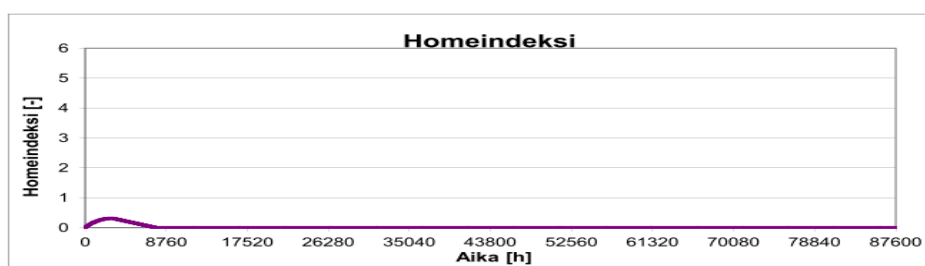
Kuvio 3. Keraamisen laatan ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



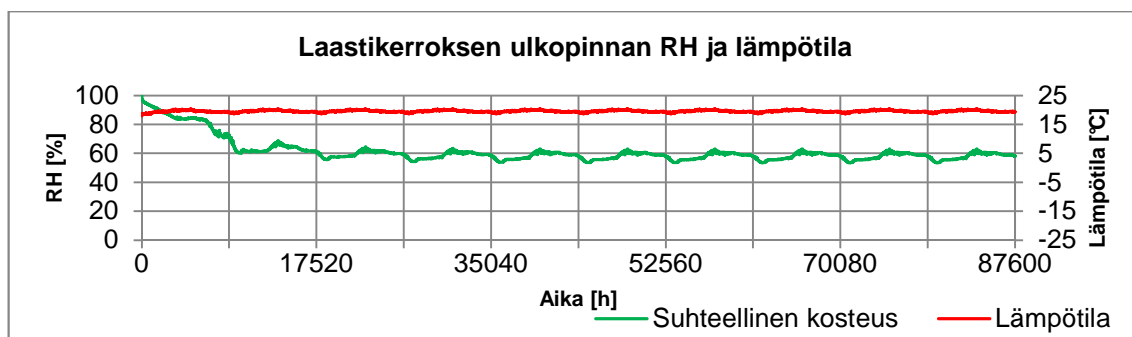
Kuvio 4. Keraamisen laatan ulkopinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 3. Suurin homeindeksi 0,298 hetkellä 2547...2951 h.



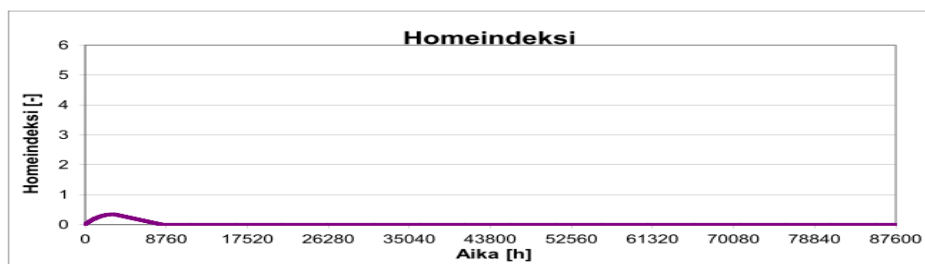
Kuvio 5. Laastikerroksen sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



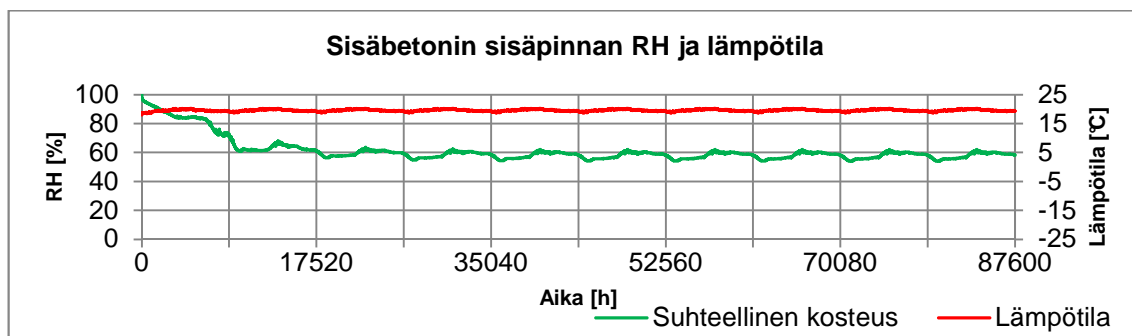
Kuvio 6. Laastikerroksen sisäpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,31 hetkellä 2693...2989 h.



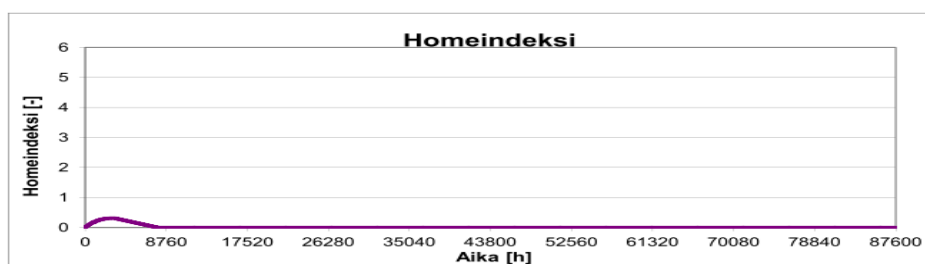
Kuvio 7. Laastikerroksen ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



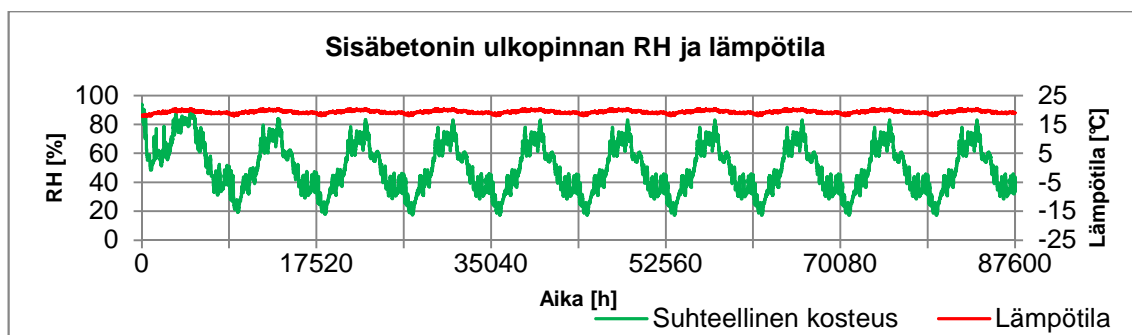
Kuvio 8. Laastikerroksen ulkopinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,343 hetkellä 2865...3140 h.



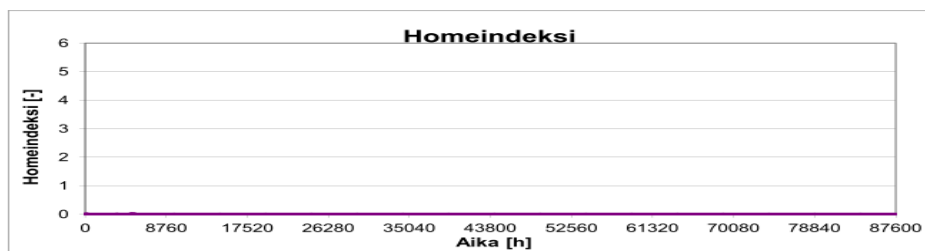
Kuvio 9. Sisäbetonin sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



Kuvio 10. Sisäbetonin sisäpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,308 hetkellä 2727...3198 h.

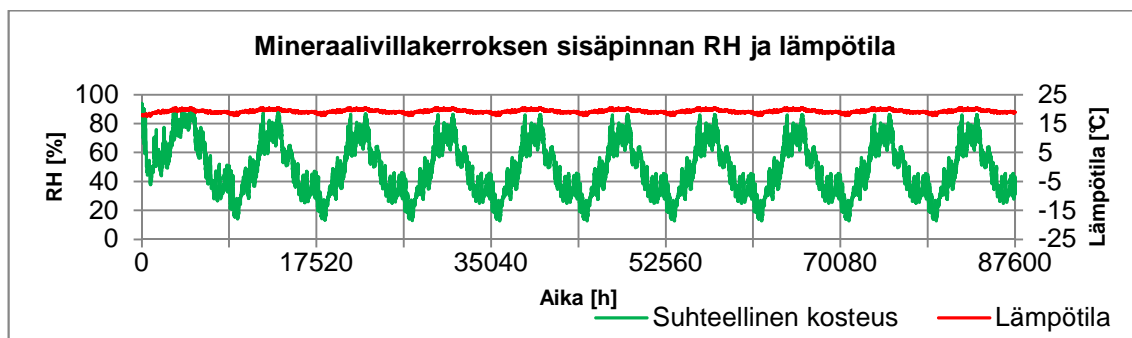


Kuvio 11. Sisäbetonin ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.

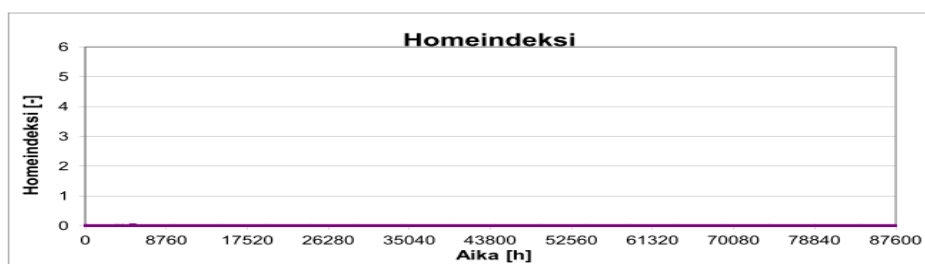


Kuvio 12. Sisäbetonin ulkopinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,012 hetkellä 5108...5130 h.

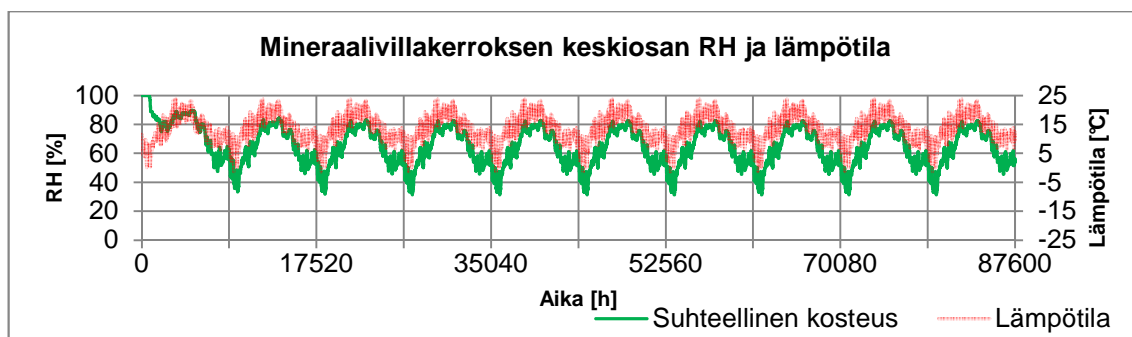




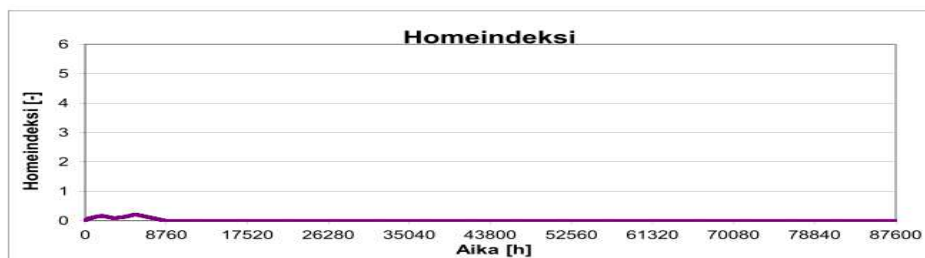
Kuvio 13. Mineraalivillakerroksen sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



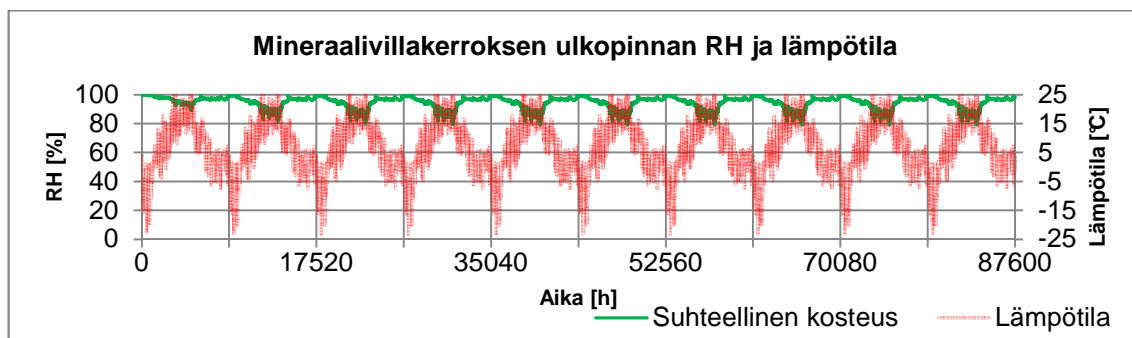
Kuvio 14. Mineraalivillakerroksen sisäpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,018 hetkellä 5070...5103 h.



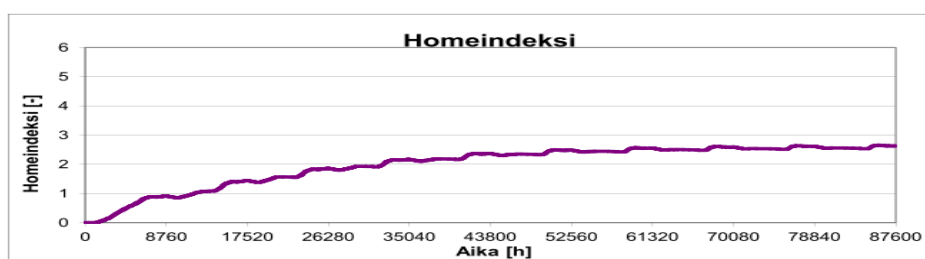
Kuvio 15. Mineraalivillakerroksen keskiosan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



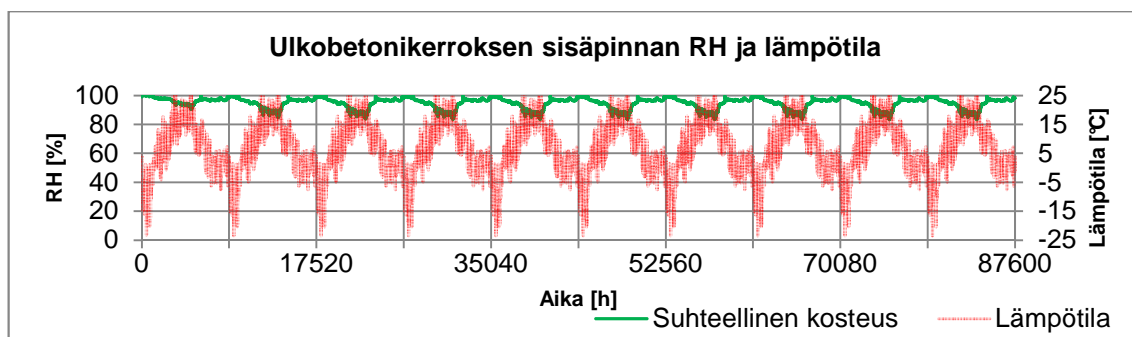
Kuvio 16. Mineraalivillakerroksen keskiosan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,211 hetkellä 5381...5459 h.



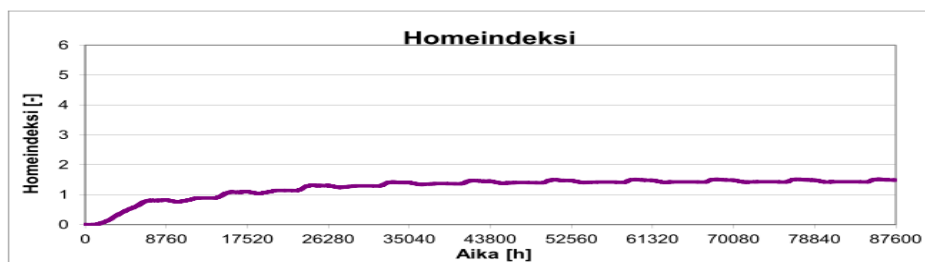
Kuvio 17. Mineraalivillakerroksen ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



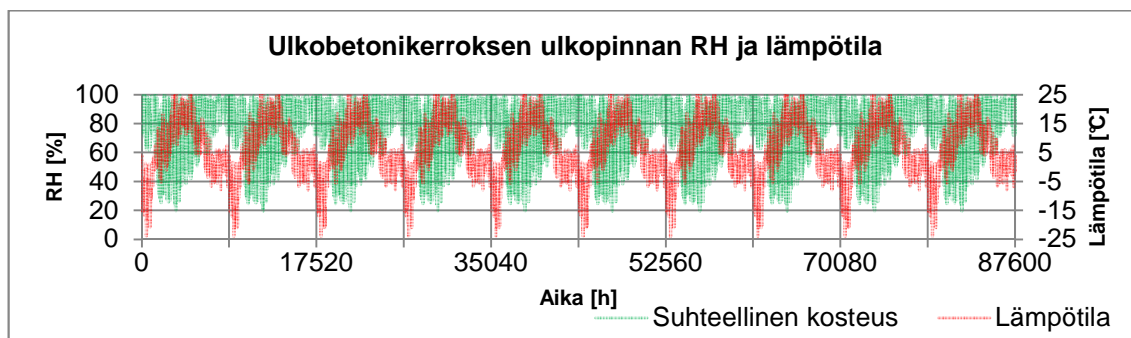
Kuvio 18. Mineraalivillakerroksen ulkopinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 2,656 hetkellä 85750...857720 h.



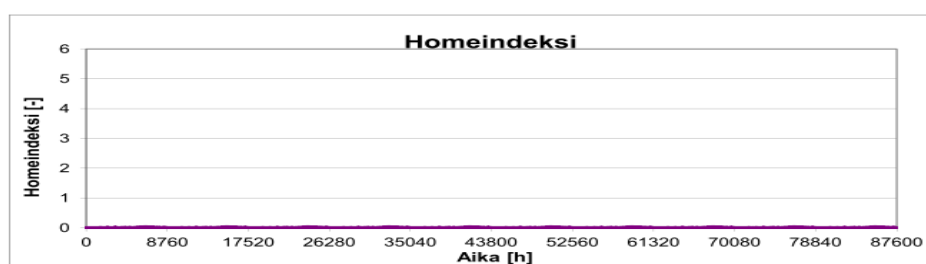
Kuvio 19. Ulkobetonikerroksen sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



Kuvio 20. Ulkobetonikerroksen sisäpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 1,519 hetkellä 59478 h.

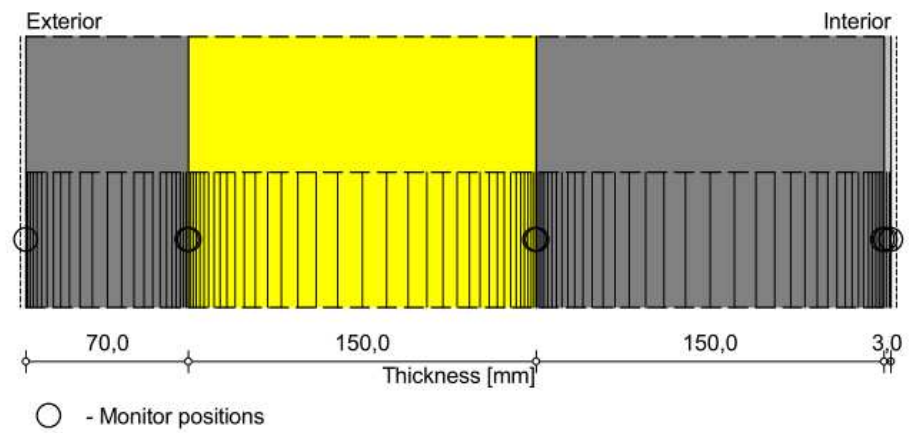


Kuvio 21. Ulkobetonikerroksen ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.







Kuvio 22. Ulkobetonikerroksen ulkopinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 4. Suurin homeindeksi 0,028 hetkellä 6322 h.

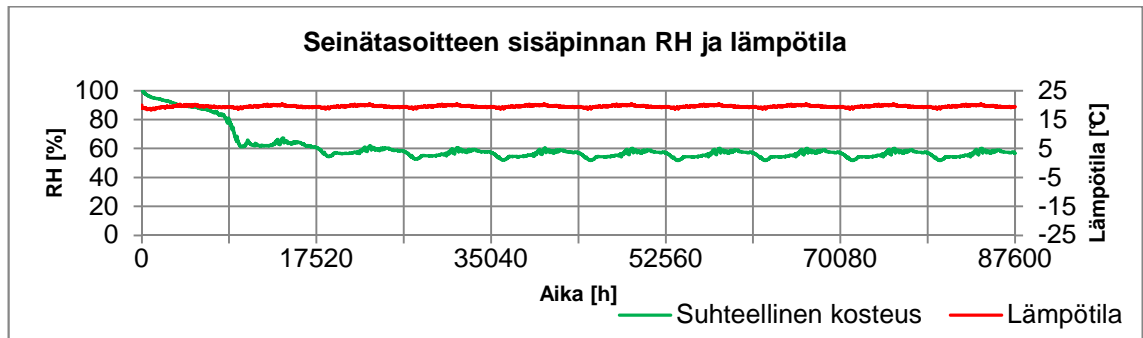
Maalipinnoite ( $S_d=2\text{ m}$ ), mineraalivilla



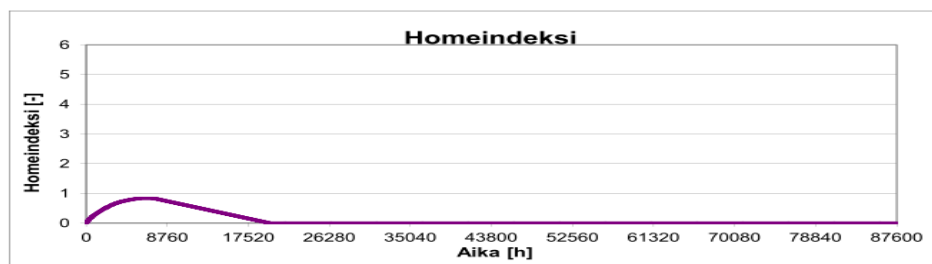
**Materials :**

-  - Concrete, C35/45
-  - Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)
-  - Concrete, C35/45
-  - \*Oikaisu- ja täyttölaasti KS25/75/500

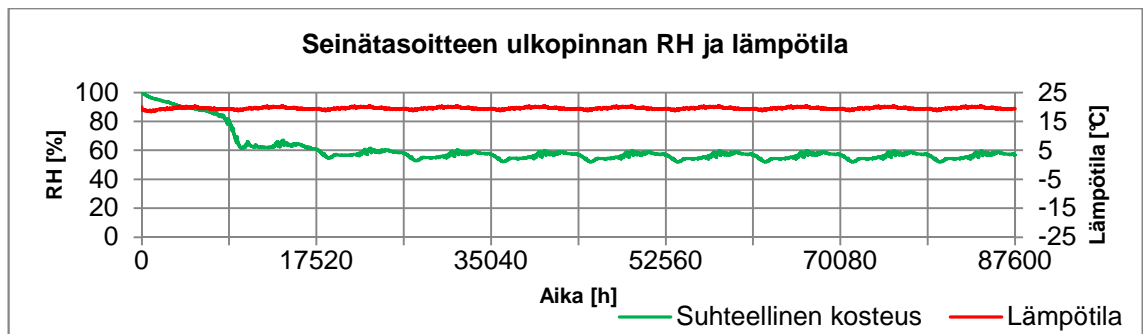
Kuva 2. Maalattun sandwichelementtiseinän rakennemalli.



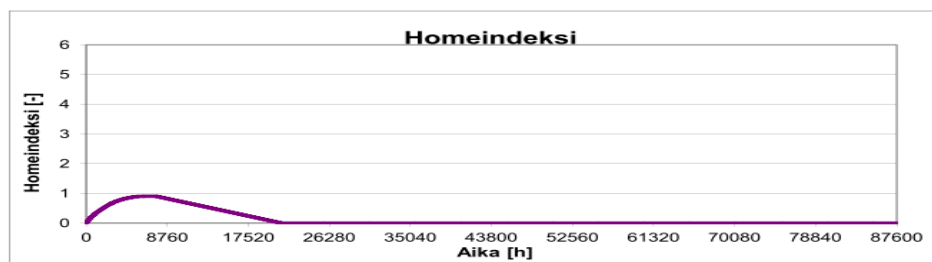
Kuvio 23. Seinätasoitteen sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



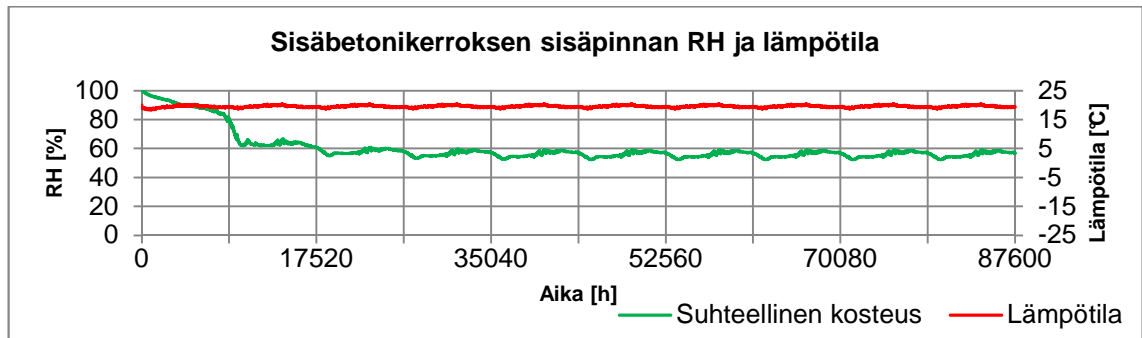
Kuvio 24. Seinätasoittekerroksen sisäpinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 3. Suurin homeindeksi 0,827 hetkellä 5787...7205 h.



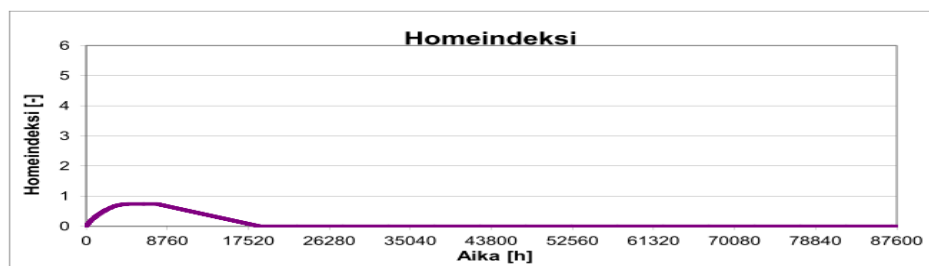
Kuvio 25. Seinätasoitteen ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



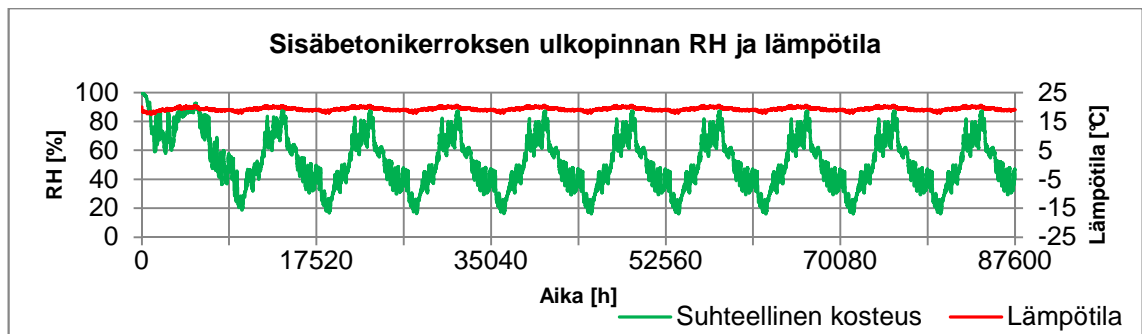
Kuvio 26. Seinätasoittekerroksen ulkopinnan homeindeksi. Herkkyysluokat 3. Suurin homeindeksi 0,901 hetkellä 6181...7577 h.



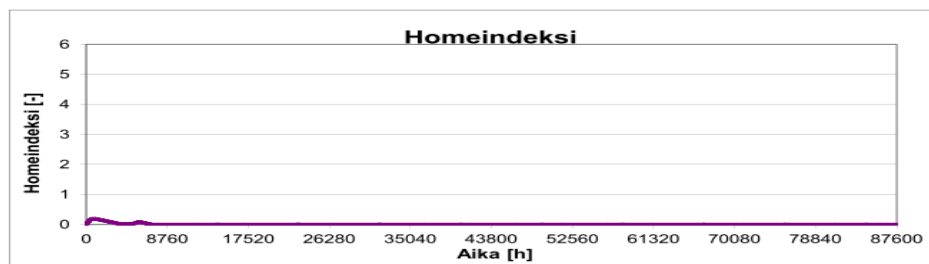
Kuvio 27. Sisäbetonikerroksen sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



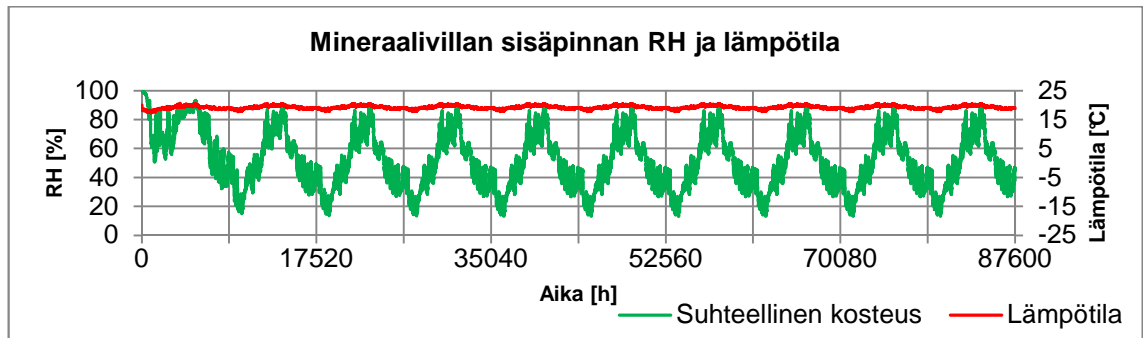
Kuvio 28. Sisäbetonikerroksen sisäpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,741 hetkellä 4752...7628 h.



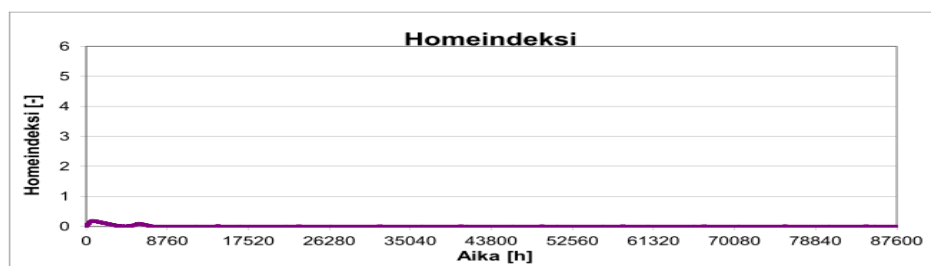
Kuvio 29. Sisäbetonikerroksen ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



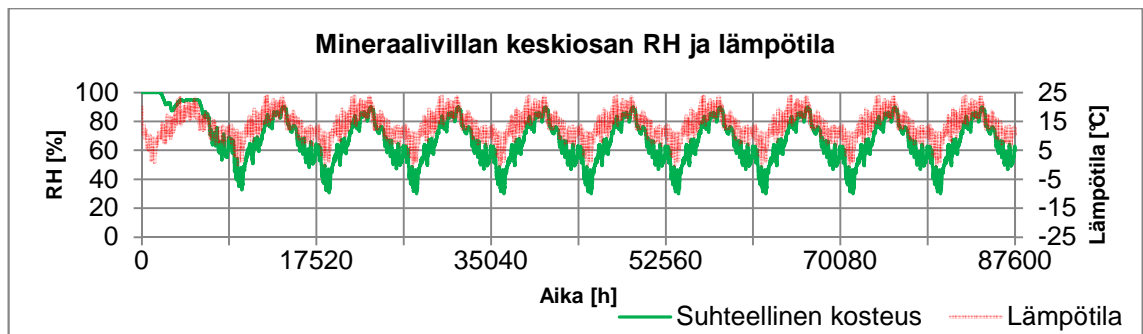
Kuvio 30. Sisäbetonikerroksen ulkopinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 0,194 hetkellä 847...865 h.



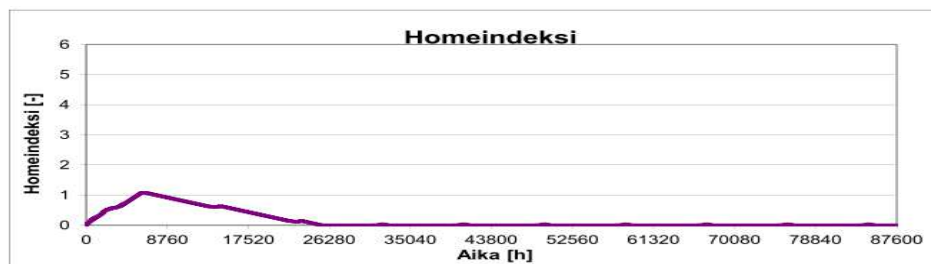
Kuvio 31. Mineraalivillan sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



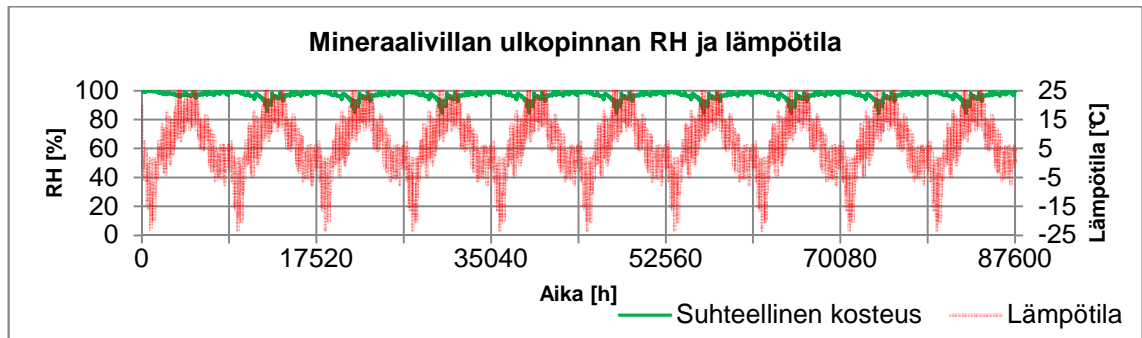
Kuvio 32. Mineraalivillan sisäpinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 0,187 hetkellä 657...686 h.



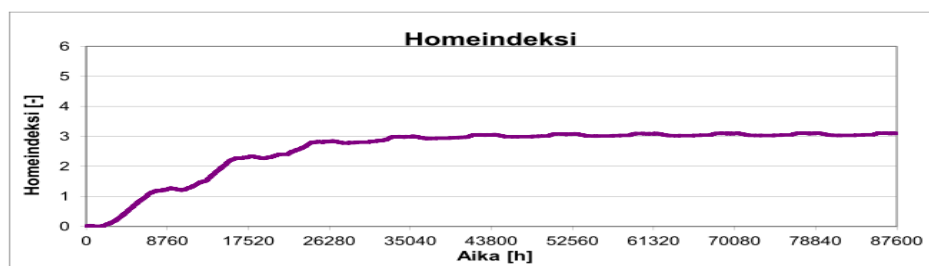
Kuvio 33. Mineraalivillakerroksen keskiosan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



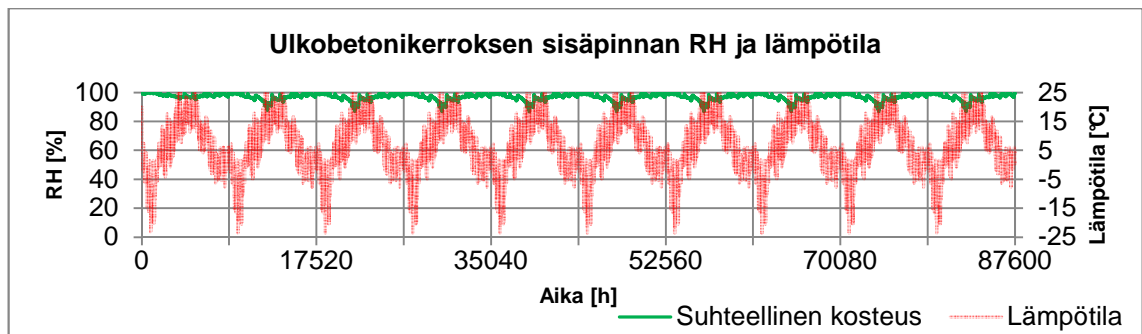
Kuvio 34. Mineraalivillakerroksen keskiosan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 1,075 hetkellä 6017...6162 h.



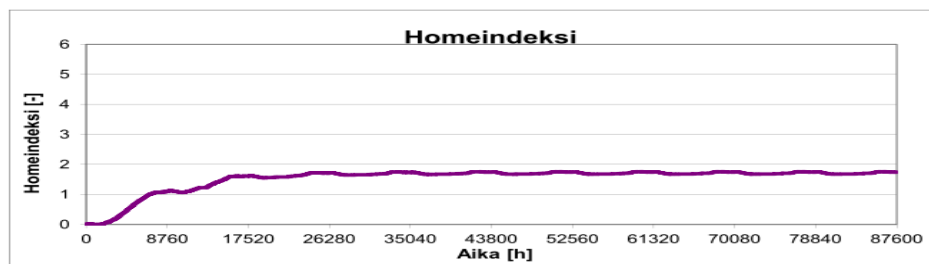
Kuvio 35. Mineraalivillan ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



Kuvio 36. Mineraalivillan ulkopinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 3. Suurin homeindeksi 3,111 hetkellä 48964 h.

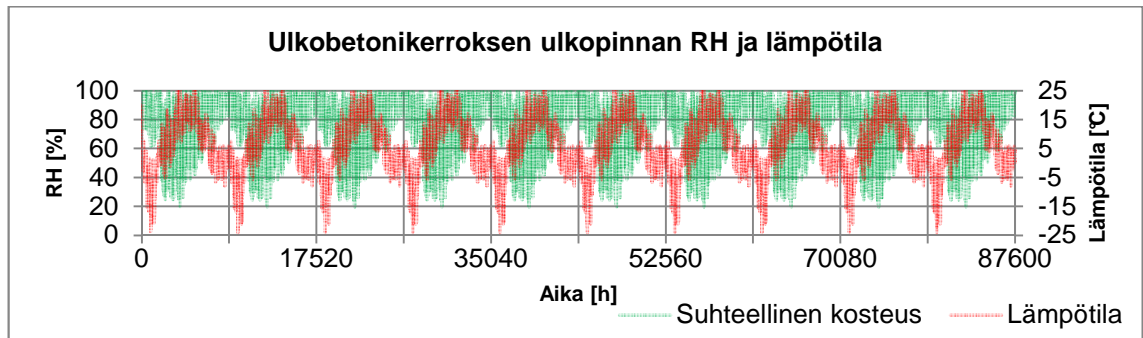


Kuvio 37. Ulkobetonin sisäpinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.

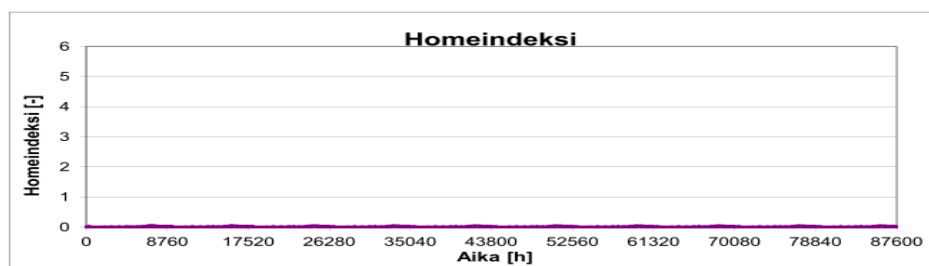


Kuvio 38. Ulkobetonin sisäpinnan homeindeksi. Kasvunopeusluokka 3, maksimimääräluokka 4. Suurin homeindeksi 1,759 hetkellä 26508 h.





Kuvio 39. Ulkobetonin ulkopinnan suhteellinen kosteus ja lämpötila.



Kuvio 40. Ulkobetonin ulkopinnan homeindeksi. Herkkyyssluokat 4. Suurin homeindeksi 0,037 hetkellä 6946 h.